Titre: Title:	Conception d'interfaces humains-machines pour la conduite de systèmes complexes
Auteur: Author:	Jean-Yves Fiset
Date:	2001
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Fiset, J.-Y. (2001). Conception d'interfaces humains-machines pour la conduite de systèmes complexes [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/8551/

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/8551/
Directeurs de recherche: Advisors:	
Programme: Program:	Non spécifié

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONCEPTION D'INTERFACES HUMAINS-MACHINES POUR LA CONDUITE DE SYSTÈMES COMPLEXES

JEAN-YVES FISET
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET
DE GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (PH. D.)
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
JANVIER 2001

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

CONCEPTION D'INTERFACES HUMAINS-MACHINES POUR LA CONDUITE DE SYSTÈMES COMPLEXES

PRÉSENTÉE PAR: FISET Jean-Yves

en vue de l'obtention du diplôme de: Philosophiae Doctor
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. GILBERT Robert, Ph.D., président
M. ROBERT Jean-Marc, doctorat, membre et directeur de recherche
M. MARCEAU Richard, Ph.D., membre
M. TESSIER Claude, Dr. Ing., membre externe

À mes deux filles, Cécile et Élisabeth, et à mon épouse, Ginette.

REMERCIEMENTS

Comme toutes les entreprises qui en valent la peine, la définition et l'exécution d'un projet de recherche posent des exigences non seulement à celui qui exécute la recherche, mais aussi à ceux qui l'épaulent dans cette démarche. Je tiens donc à remercier:

- M. Jean-Marc Robert qui m'a encouragé et guidé tout au long de mes études graduées et sans l'appui duquel je n'aurais pas mené ce projet à terme.
- Les différents collègues que j'ai côtoyés lorsque j'étais chargé de recherches pour Énergie Atomique du Canada Ltée au Laboratoire Nucléaire de Chalk River et qui ont partagé, quelquefois de façon intense, leurs opinions et connaissances.
- M. Bernard Clément du département de mathématiques et de génie industriel, qui m'a conseillé pour l'analyse statistique d'une partie des résultats.
- Les étudiants qui ont accepté de participer aux diverses séances de validation expérimentale.
- Enfin, les professeurs du département de mathématiques et de génie industriel qui, à l'occasion de mes études au baccalauréat et aux cycles supérieurs, m'ont donné l'occasion d'approfondir mes connaissances dans le domaine des systèmes humains-machines.

RÉSUMÉ

La surveillance et la commande (désignées ici collectivement sous le nom de conduite) des processus complexes, tels qu'on en trouve dans les raffineries, les usines de pâtes et papiers, les alumineries, les centrales nucléaires, l'aéronautique, et les applications maritimes et médicales, s'exécutent habituellement par l'intermédiaire d'une interface entre le processus et un ou plusieurs opérateurs. On parle alors d'une interface humain-machine. Une conception appropriée de ce type d'interfaces revêt donc une importance considérable, car c'est l'outil principal mis à la disposition des opérateurs pour atteindre les objectifs de sûreté et de productivité des entreprises.

Un examen des méthodes existantes de conception d'interfaces humains-machines, qu'elles soient en usage dans les industries ou qu'elles aient été proposées par des chercheurs, montre qu'elles présentent de nombreuses lacunes. Ces lacunes ont trait soit aux situations de conduite (normales ou dégradées) pour lesquelles elles sont utilisables, soit à l'encadrement et au soutien fournis aux concepteurs des interfaces. De plus, les validations expérimentales de ces méthodes n'ont pas toujours produit les résultats escomptés.

Cette recherche vise donc à développer et à tester expérimentalement une méthode de conception d'interfaces humains-machines pour la conduite de processus complexes; en particulier, on s'intéresse ici aux applications industrielles. On vise aussi à ce que cette méthode soit simple à mettre en oeuvre, du moins comparativement aux méthodes ergonomiques couramment utilisées.

En dépit des lacunes qui ont été mentionnées, l'examen des méthodes existantes a permis de relever un ensemble d'éléments qui devraient être inclus dans une méthode améliorée. On a aussi conclu qu'une telle méthode devrait intégrer des connaissances additionnelles

portant sur les caractéristiques des opérateurs et du processus. Pour identifier et intégrer ces connaissances additionnelles, on a eu recours à un ensemble de tâches génériques qui sont propres à la conduite de processus complexes. Ces tâches génériques, qui avaient initialement été proposées par d'autres chercheurs pour modéliser le comportement des opérateurs, ont été précisées et adaptées aux fins de conception d'interfaces. On a ainsi pu définir, pour chaque tâche générique, le type d'informations à fournir aux opérateurs et le moment où elles devaient être rendues disponibles; les sources d'informations appropriées (p. ex., modèle de la tâche de l'opérateur, modèle causal du processus) ont aussi été identifiées. Cette utilisation de tâches génériques constitue une première innovation car jusqu'ici, les méthodes qui avaient été proposées reposaient soit sur une analyse au cas par cas des tâches exécutées par les opérateurs ou encore sur une analyse du processus, mais non sur les deux.

Pour atteindre l'objectif de simplicité dans la mise en oeuvre de la méthode, on en a intégré les différents éléments à l'intérieur d'une architecture, appelée Tagci[1], qui pourra être utilisée par les concepteurs comme un canevas pour la conception de nouvelles interfaces. L'idée d'avoir recours à des canevas a déjà été exploitée sur une très petite échelle pour des applications de faible envergure dans des domaines commerciaux, comme lors de la conception de boîtes de dialogue normalisées pour la conception d'assistants. Dans cette recherche, cependant, on a adopté un point de vue beaucoup plus large; ainsi, pour une application de contrôle de processus, Tagci peut être utilisée pour définir l'ensemble de la structure de l'interface humain-machine. Il s'agit là d'une contribution originale de la recherche.

Pour tester les possibilités et les limites de la méthode, on a d'abord effectué des essais en laboratoire avec des groupes de sujets utilisant, dans un cas, une interface traditionnelle et, dans l'autre cas, une interface élaborée à partir de Tagci pour effectuer diverses

manoeuvres sur un processus simulé. Deux types d'évaluations en laboratoire ont eu lieu:

- Lors de situations de conduite sans pannes, on a comparé divers aspects de la performance de sujets exploitant la nouvelle interface par rapport à celle de sujets exploitant une interface traditionnelle. Cette étude a montré que l'exploitation de la nouvelle interface entraînait une amélioration significative de la stabilité du processus, mesurée en terme du nombre de commandes utilisées par les opérateurs pour atteindre et maintenir les consignes de production. On a aussi constaté diverses indications suggérant des améliorations bien que les mesures de celles-ci n'aient pas atteint les seuils de signification statistique qui avaient été choisis. Ainsi, les sujets utilisant l'interface Tagci ont subi en moyenne, et pour tous les essais, moins de déclenchements des systèmes assurant la sûreté du processus. De plus, ils ont ressenti, en moyenne et pour tous les essais, une charge mentale de travail moindre que celle ressentie par les sujets utilisant l'interface traditionnelle. Par ailleurs, et bien que les différences entre les deux groupes de sujets n'aient pas non plus atteint le seuil de signification statistique choisi, la nouvelle interface a semblé induire une stratégie de commande plus prudente qui réduisait la production totale. Cependant, cette réduction était limitée et s'amenuisait en fonction de la longueur des essais; de plus, on croit qu'une optimisation de l'interface Tagci permettrait de renverser cette situation.

- Lors de situations de conduite avec pannes, on a comparé à nouveau les différences de performance des deux groupes de sujets. On a constaté que même si les différences n'atteignaient généralement pas les seuils de signification statistique choisis, les sujets utilisant l'interface Tagci obtenaient systématiquement de meilleurs résultats que ceux utilisant l'interface traditionnelle en termes de charge mentale de travail ressentie, de qualité de détection des pannes et de diagnostic de leur cause. Par ailleurs, on a aussi observé que les sujets utilisant l'interface traditionnelle semblaient atteindre une

---

1 Pour Tâches et architecture génériques pour la conception d'interfaces.

production plus élevée que ceux utilisant l'interface Tagci.

Les validations précédentes ont eu lieu sur un processus de petite taille et dans un environnement de laboratoire avec des sujets novices.

On a aussi procédé à une validation additionnelle de Tagci pour une application dans un processus de grande envergure, soit la surveillance de paramètres dans une centrale nucléaire. Cette validation visait à montrer que Tagci permettait d'expliquer la présence des types d'informations contenus dans des interfaces utilisées dans ce type d'application, et que ces types d'interfaces ne contenaient pas plus d'informations que ce qui était requis par Tagci. On a effectué cette validation en analysant systématiquement le contenu d'une interface de référence, qui avait déjà été validée empiriquement lors de travaux antérieurs à cette recherche, et en en comparant le contenu avec les types d'informations qui étaient requis par Tagci. Les résultats ont montré que Tagci permettait de définir les informations requises pour ce type d'interfaces.

Bien que les résultats obtenus soient encourageants, leur généralisation est limitée par plusieurs facteurs dont: la simplicité relative du processus utilisé pour les validations expérimentales, l'ampleur réduite des interfaces comparées, le petit nombre de sujets (en particulier pour les expérimentations en situation incidentelle) et la courte durée des expérimentations. En dépit de ces limites, l'architecture générique d'interfaces humains-machines proposée présente suffisamment d'avantages pour que plusieurs de ses éléments puissent être utilisés pour des applications réelles. En particulier, l'intégration d'une perspective « tâche » et d'une perspective « processus » pour soutenir les tâches de transition et de surveillance, respectivement, apparaît comme une façon innovatrice de concevoir de meilleures interfaces. De plus, l'utilisation de cette architecture a permis de définir d'une façon opérationnelle des concepts qui étaient restés flous jusqu'ici telle que la « vue d'ensemble » d'une installation.

Une conclusion inattendue de la recherche est que la tendance courante consistant à tenter de rendre les interfaces capables d'expliciter toutes les relations existant entre les variables du processus, de façon à permettre à l'opérateur d'élaborer seul un plan de conduite optimal, apparaît, du moins dans le domaine étudié et à l'heure actuelle, comme une utopie. En effet, les observations réalisées lors des expériences indiquent que certaines connaissances spécifiques sont essentielles pour une bonne performance de l'opérateur. Par exemple, un opérateur doit posséder des notions sur les relations entre les variations d'énergie, de masse et de température du processus, les caractéristiques des vannes qu'il commande, etc. Il semble illusoire de tenter d'incorporer tous ces éléments dans l'interface servant à la conduite d'un processus ne serait-ce qu'à cause de l'abondance de ces informations. Il faut donc prendre en compte la formation dispensée aux opérateurs, au moment de la conception d'interfaces humains-machines, et ce, de façon bien plus systématique qu'il n'a été fait jusqu'ici. Cette constatation permet d'ouvrir (ou plutôt de ré-ouvrir) une piste de recherche qui a été quelque peu délaissée et portant sur la définition optimale du contenu des programmes de formation des opérateurs. D'autres lacunes dans l'état de la connaissance suggèrent aussi plusieurs nouveaux axes de recherche. Parmi ceux-ci, on peut mentionner l'amélioration du niveau de détails de l'architecture et l'arrimage entre cette dernière et les recommandations et lignes directrices ergonomiques existantes, ainsi que la possibilité d'effectuer la sélection des opérateurs, à partir de leur performance lors de tâches simulées sur un processus complexe servant d'étalon.

ABSTRACT

The monitoring and control of complex processes, such as those found in the petro-chemical, aeronautics, nuclear and medical domains, are usually carried out through an interface between the process and one or more operators. This type of interface is thus called a human-machine interface. The proper design of such an interface is of paramount importance as it constitutes the main tool provided to the operators to achieve the safety and productivity goals of the organization.

An analysis of existing methods for designing human-machine interfaces, used either in the industry or proposed by researchers, reveals that they have numerous shortcomings. Those shortcomings are related to either the kind of situations (normal or abnormal) to which they apply or to the kind of support the methods provide to the interface designers. Further, experimental validations of these methods have not always yielded satisfactory results. This research thus aims at developing and testing experimentally a method to design human-machine interfaces for monitoring and control applications, and more specifically for industrial settings. It is also intended that the method be simple to implement, at least in comparison with existing human factors engineering practices.

In spite of the existence of shortcomings, the examination of existing methods has led to the identification of several elements that should be included into an improved method; it has also been concluded that the latter should integrate additional knowledge pertaining to the operators and to the processes being supervised and controlled. This additional knowledge has been identified and integrated through the use of a series of generic process control tasks, initially proposed by other researchers for modeling operator decision-making; these generic tasks have been made more precise and have been adapted for supporting interface design. For each generic task, the kind of information required to support it and the moment that it should be made available have been defined; suitable

information sources (e.g., operator's task models, process' causal models) have also been identified. This use of generic tasks to identify information needs constitutes itself an innovation as the existing interface design methods rely either on an analysis of the operator's tasks or on an analysis of the process, but not on both.

To achieve the objective of simplicity in implementing the new method, its constitutive elements have been integrated into an architecture called Tagci[2]; interface designers will then be able to use it as a design pattern for new applications. Design patterns are a new area for human-machine interfaces, where they have been used for very limited applications such as the design of standardized interaction components for wizards. This research takes a wider perspective; as such, Tagci can be used as a pattern to identify the various types of information that a human-machine interface must provide to the operator. This is a key contribution of this research.

To test the possibilities and limits of Tagci, experimental validations have been carried out in a laboratory setting with a group of subjects using a conventional human interface and another group using an interface designed with Tagci to carry out different tasks on a simulated process. Two types of experimental validations have been carried out:

- During normal (i.e., without faults) trials, several performance indicators have been compared between the two groups of subjects. This comparison has shown that the Tagci interface improved substantially the stability of the process, as measured by the number of control actions required to achieve and maintain the operating targets. Other improvements have been noted even though they did not reach the statistical significance thresholds chosen for the validations. These improvements are that the subjects using the Tagci interface experienced a lower average number of triggering of the systems used to maintain process safety and a lower average mental workload.

---

[2] Acronym for the French « Tâches et architecture génériques pour la conception d'interfaces ».

Also, and even though the difference did not reach statistical significance, the Tagci interface seemed to induce a more conservative control strategy which led to a somewhat lower total production during the trials. However, this reduction was limited and its impact decreased as a function of trial length; further, we believe that an optimization of the Tagci interface could reverse this situation.

- During abnormal (i.e., with a process fault) trials, several performance indicators have again been compared between the groups of operators. Even though most of the performance difference did not reach statistical significance, the subjects using the Tagci interface systematically achieved better results than those using the conventional interface in terms of mental workload and of the quality of fault detection and diagnosis. It was also found that the subjects using the conventional interface achieved a higher production that those using the Tagci interface.

The previous validations were carried out on a small scale process and in a laboratory setting with novice subjects.

A further validation of Tagci has also been carried out for the monitoring of parameters on a large scale process, that is, in a nuclear power plant. This validation aimed at demonstrating that Tagci could explain why specific information was displayed in interfaces used in this type of application, and that these interfaces did not contain information that was not required by Tagci. This demonstration was carried out by systematically analyzing the content of a reference interface, which had been empirically validated prior to this research, and by comparing it with the information required by Tagci. The results of this validation have shown that Tagci can be used to define the information required for this kind of interface.

Even though the previous results are encouraging, their generalization is limited by several factors such as the relative simplicity of the simulated process used during the experimental validations, the small size of the interfaces that were compared, the small number of subjects (especially for the trials with faults) and the short duration of the experiments. In spite of these limitations, the generic human-machine interface architecture proposed appears sufficiently advantageous so that several of its elements can be used in real applications. In particular, the integration of a task and of a process perspective to support transition and monitoring tasks, respectively, appears as a new and promising way to design human-machine interfaces. Also, the use of the generic architecture has allowed us to provide an operational definition of a fuzzy, yet frequently used, concept, that of process overview.

An unexpected conclusion of this research is that the current trend of attempting to make interfaces capable of showing all of the relationships between the process' variables and thus enabling the operator to devise an optimal control plan appears to be, at least in industrial applications and at the moment, unachievable. Observations carried out during the experimental validations have indicated that specific knowledge is necessary for the operator to reach a satisfactory performance. For instance, an operator must master various notions about the relationships between the variations of energy, mass and temperature in a process, the operating characteristics of the valves, etc. It appears unrealistic to attempt to incorporate all of this information on the human-machine interface, even if only because of the volume of such knowledge. It thus appears that the operator training should be considered, during interface design, in a much more systematic way than it currently is. This suggests the opening (or re-opening) of a research topic dealing with the optimal definition of the content of operator training programs.

Other research areas can be identified following the research presented here. Among those, we can mention the improvement of the generic architecture and the enhancement of its links with the existing human factors guidelines and recommendations, as well as the selection of operators on the basis of their performance with a reference complex process.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Sigle ou abréviation	Signification
ABC	Arbre des buts et des chemins.
EID	De l'anglais « Ecological Interface Design ».
FAST	De l'anglais « Function Analysis System Technique ».
GTST	De l'anglais « Goal Tree Success Tree ».
IHM	Interface humain-machine.
IMAC	De l'anglais « Interactive Monitoring and Control ».
MFM	De l'anglais « Multi-level Flow Modeling ».
OFM	De l'anglais « Operator Function Model ».
P & ID	De l'anglais « Piping and Instrumentation Diagram ».
RPD	De l'anglais « Recognition-Primed Decision Making ».
SRK	De l'anglais « Skill, Rule, Knowledge ».

LISTE DES ANNEXES

CHAPITRE 1: INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, on observe une augmentation de l'attention portée à la productivité et à la sûreté des processus complexes. Comme exemples de processus complexes, on peut citer les raffineries, les usines de pâtes et papiers, les alumineries, les centrales nucléaires, ainsi que les applications aéronautiques, maritimes et médicales.

Depuis le début, la conduite[3] de ce type de processus pose des problèmes importants. Par exemple, les lacunes dans les outils et les moyens mis à la disponibilité de l'exploitation pour gérer les situations anormales entraînent des pertes annuelles estimées à 10 milliards de dollars (U.S.), et ce, dans la seule industrie pétro-chimique américaine (Cochran et Bullemer, 1996). La qualité des moyens de surveillance et de commande utilisés par les opérateurs a aussi souvent été mise en cause lors de plusieurs incidents et accidents graves (Meshkati, 1991).

De façon globale, la recherche présentée ici s'intéresse à la problématique de l'amélioration de la performance des opérateurs devant surveiller et commander des processus complexes, en particulier pour des applications industrielles. Dans ce chapitre, on définit d'abord le contexte de la recherche et on précise ensuite cette dernière. On en décrit alors les objectifs et les limites, et on en explique l'organisation et le déroulement.

1.1 Contexte

L'étude de la conduite des processus complexes est une entreprise difficile, notamment à cause du nombre et de la diversité des éléments en cause. La figure suivante montre une vue d'ensemble de ces éléments.

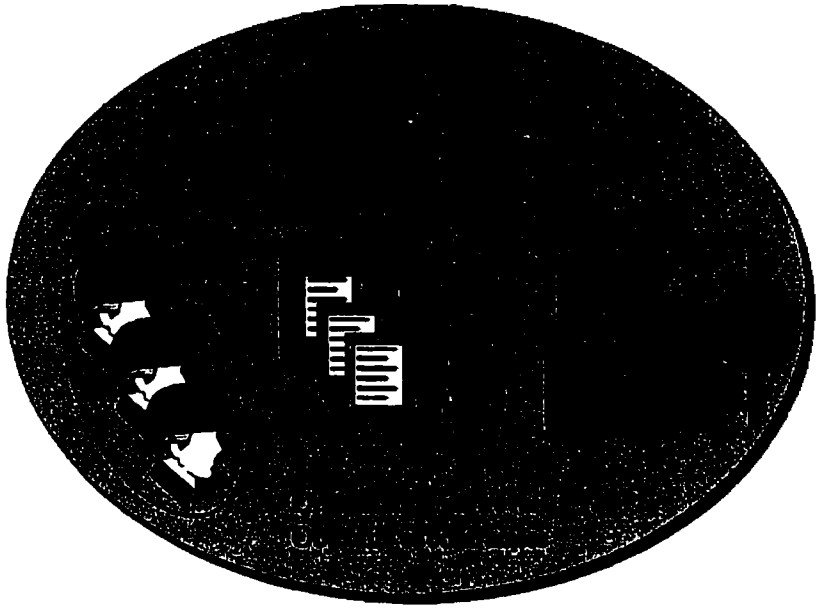


Figure 1-1: Vue d'ensemble de la conduite des processus complexes.

Dans une situation typique de contrôle de processus, on retrouve:

- Un ou plusieurs opérateurs, ayant la responsabilité de la conduite du processus. Ces opérateurs sont généralement localisés dans une salle de commande bien qu'ils puissent aussi être mobiles; de plus, ils ont souvent à communiquer avec d'autres opérateurs chargés d'effectuer des manoeuvres locales sur des équipements en usine.

- Diverses tâches, exécutées par les opérateurs, et visant à assurer la bonne marche des opérations et l'atteinte des objectifs de conduite; ces derniers sont généralement de deux ordres, soit la productivité et la sûreté des opérations. En général, on peut distinguer les tâches principales de conduite et les tâches de soutien. On définit ainsi:

  - Les tâches principales, où les actions de l'opérateur influent directement et à court terme sur le processus, soit la conduite déjà citée. Comme exemples, de tâches de conduite, citons le démarrage ou l'arrêt du processus, le changement

---

[3] On désigne par ce terme les activités de surveillance et de commande d'un processus.

du niveau de production ou le passage à de nouvelles cibles pour les paramètres de production ou de qualité du produit.

- Les tâches de soutien, visant à améliorer l'efficacité à long terme, ou la bonne marche, du processus mais qui ne l'influencent pas directement, du moins à court terme. Ce genre de tâches correspond, par exemple, à de la collecte de données en vue d'études d'efficacité, au soutien apporté à d'autre personnel lors de la calibration d'instruments, à la tenue d'un journal de bord, etc.

- Une interface humain-machine (IHM) par l'entremise de laquelle le ou les opérateurs peuvent effectuer la conduite. L'interface comprend tous les éléments consultés ou manipulés par le ou les opérateurs tels que les affichages informatisés ou non, les dispositifs de commande (p. ex., les boutons, les manettes), et les manuels et procédures d'opération. Il faut noter qu'outre les opérateurs, d'autres types de personnel (superviseurs, techniciens, gestionnaires, ingénieurs de processus, etc.) sont susceptibles d'utiliser l'IHM, notamment pour soutenir l'exécution des tâches de soutien mentionnées précédemment.

- Les objectifs et les contraintes imposés à l'exploitation du processus. On peut ainsi identifier des objectifs de conduite et des contraintes (p. ex., environnementales, économiques) venant influencer la façon dont les opérations seront menées.

- Le processus lui-même; les attributs qualitatifs suivants contribuent à la complexité de la prise de décision des opérateurs (Roth et Woods, 1988):

  - Grand nombre de variables à contrôler et interactions entre les variables.

  - Existence de relations temporelles entre les variables à contrôler.

  - Objectifs de conduite souvent multiples et qui peuvent être conflictuels (p. ex., l'équilibre entre les exigences de productivité et de sûreté).

  - Niveau de risque élevé pour le personnel, le public, l'environnement et l'équipement.

De façon générale, un processus (ou système) est composé de sous-systèmes, qui sont à leur tour composés de sous-sous-sytèmes, etc. Ces systèmes et sous-systèmes sont reliés entre eux soit par des liens physiques (échange de masse ou d'énergie), soit par des liens informationnels, ou les deux. Un ou plusieurs opérateurs exploitent alors ces systèmes et sous-systèmes pour accomplir la mission dévolue à l'ensemble humain-machine. On peut décrire des propriétés importantes des processus industriels à partir de l'exemple montré à la figure suivante, soit celui d'une machine à papier.

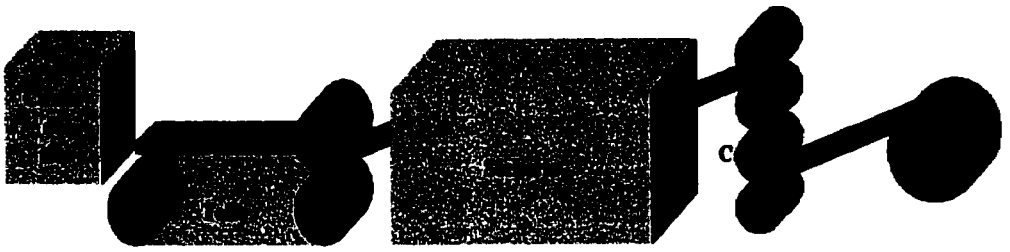


Figure 1-2: Exemple de processus - machine à papier.

De façon simplifiée, la pâte à papier est introduite au cuvier de tête de la machine d'où elle est acheminée à la toile pour y être mise en forme, transportée vers les presses pour en extraire une partie de l'eau, envoyée à la sécherie et amenée à la calendre pour améliorer le fini du papier qui est ensuite enroulé. On constate que (qu'):

- Il existe un fort couplage fonctionnel entre les éléments (p. ex., entre le cuvier de tête et la toile) composant le processus quand ce dernier est en mode de production.
- Quand le système est à l'arrêt, ce couplage est normalement plus faible, et quelquefois inexistant. Ceci implique que la mise en marche d'un système impose souvent d'effectuer un couplage entre un certain nombre de ses sous-systèmes et d'en assurer la coordination.

- On retrouve à l'intérieur d'un système divers délais liés aux distances parcourues ou au temps de réaction de divers éléments (p. ex., temps de parcours d'un conduit par un liquide). D'autres phénomènes temporels sont aussi susceptibles d'exister (p. ex., constantes de temps). Certains de ces éléments temporels peuvent aussi être variables.
- Il existe des relations entre les variables d'un système; ces relations correspondent à des gains (p. ex., $gain_{12} = \Delta$ variable 1 / Δ variable 2). Ces gains peuvent être fixes ou variables selon le type de processus.

Plusieurs autres caractéristiques des processus (p. ex., stabilité, fiabilité des composants) affectent aussi la performance des opérateurs.

- L'organisation du travail, qui détermine la composition et le fonctionnement des équipes, l'interaction entre les différents groupes de travailleurs, la formation requise et les horaires de travail.

1.2 Précision de la problématique

La conduite de processus complexes requiert l'utilisation d'IHM appropriées pour atteindre des résultats satisfaisants par rapport à la sûreté et à la productivité des opérations. Traditionnellement, les IHM étaient câblées[4] et étaient situées à proximité des équipements composant le processus que l'opérateur devait superviser. Avec l'augmentation de la taille et de la complexité des installations, et en tirant avantage des possibilités offertes par la technologie moderne (p. ex., communications électroniques plutôt que pneumatiques), il est devenu plus pratique de centraliser ces IHM câblées dans des salles de commande; ceci a aussi permis de bénéficier d'une réduction des coûts d'installation et d'entretien et de simplifier la coordination du personnel.

Plus récemment encore, on s'est tourné vers les systèmes informatisés de conduite de processus pour augmenter la performance et la fiabilité des installations (Kolski, 1997); on en a aussi profité pour tenter de réduire les coûts en réduisant le nombre d'opérateurs requis pour effectuer la conduite.

En dépit des différentes solutions technologiques retenues pour les implanter, les IHM présentent un certain nombre de lacunes:

- La conception repose fréquemment, en tout ou en partie, sur une philosophie dite « une mesure - un affichage » selon laquelle tout ce qui est mesuré (ou presque) est présenté à l'opérateur, qui doit alors utiliser ces données comme l'exige la situation. Ainsi, les données brutes associées à un système ou sous-système sont présentées, qu'elles soient pertinentes ou non, d'où une charge informationnelle qui peut devenir élevée pour l'opérateur (Rasmussen, 1985).
- Les alarmes sont souvent associées à des mesures individuelles; elles sont normalement déclenchées lors de l'atteinte de limites minimales ou maximales soit en valeur absolue, soit en terme de taux de changement. La présentation d'informations relatives aux alarmes qui sont utiles pour les opérateurs et l'élimination des informations inutiles ne sont habituellement pas adéquates et nécessitent fréquemment des modifications aux systèmes existants (Henningsen et Kemmerer, 1995).
- Les données brutes présentées aux opérateurs doivent fréquemment être intégrées pour être utiles. Un exemple dramatique de cette insuffisance est survenu lors de l'accident de la centrale nucléaire de Three Miles Island. Lors de l'accident, les opérateurs disposaient des données de pression et de température devant leur permettre d'évaluer la capacité du caloporteur (liquide de refroidissement) du coeur du réacteur. Toutefois, ces données prises séparément ne suffisent pas; il faut les

---

[4] On entend ici par interfaces câblées les dispositifs composés de surfaces fixes (p. ex., panneau de métal) sur lesquelles sont montés des cadrans, des enregistreurs sur papier, des manettes, etc.

considérer simultanément, avec en plus une courbe de saturation thermodynamique, pour connaître l'état réel du liquide de refroidissement. L'absence de cette intégration d'information a contribué à l'accident.

- En général, on associe, sur les IHM, des groupes d'informations à des sous-systèmes; on dit alors que ces IHM sont orientées vers les systèmes. Lors d'une anomalie, le groupement des informations par sous-systèmes tend à rendre l'identification de la (ou des) cause(s) de l'anomalie difficile, notamment à cause des interactions (p. ex., rétroaction) entre les divers sous-systèmes.

À ces lacunes s'ajoutent d'autres difficultés plus spécifiques liées à l'utilisation des systèmes informatisés de contrôle-commande, soit:

- L'accroissement de l'intégration et de la complexité des systèmes ou des processus commandés, ce qui impose une tâche plus lourde et complexe aux opérateurs (Fanchini, 1991).

- La diminution du nombre d'opérateurs et l'accroissement des responsabilités de ceux qui restent (Mitchell et Saisi, 1987).

- L'ajout de nouvelles contraintes pour accéder à l'information. Alors que les IHM cablées fournissent un accès parallèle quasi-complet à l'information, les systèmes informatiques de contrôle-commande ont une surface de présentation plus petite (c.-à-d., les écrans de visualisation, avec éventuellement quelques panneaux câblés), où l'opérateur accède à l'information plus ou moins en série.

- L'absence de méthode pour concevoir, de façon systématique et à coup sûr, l'imagerie des écrans de visualisation utilisés dans les salles modernes de commande (Fanchini, 1991). On peut distinguer deux facettes de la conception de l'imagerie. La première facette concerne la conception des éléments lexicaux des images (p. ex., la taille des caractères, l'utilisation des couleurs et des composants de présentation) et pour laquelle il existe une abondante littérature. Ces préoccupations lexicales sont importantes, mais elles sont insuffisantes. En effet, la seconde facette implique

l'identification des types d'informations à fournir, et à quel moment elles doivent être fournies. Certaines méthodes visant à répondre à ces questions ont été proposées par des chercheurs, mais, comme on le verra, elles présentent des lacunes très importantes et sont inadéquates pour concevoir une IHM satisfaisante.

La position défendue ici est qu'il n'existe pas encore de méthode de conception permettant d'identifier, de façon correcte et systématique, quels types d'informations présenter et quand les présenter. Cette lacune conduit à la conception d'interfaces qui ne favorisent pas une bonne performance de la part des opérateurs chargés de la conduite des processus complexes; cette position vaut pour l'exploitation des interfaces câblées et des interfaces informatisées. Toutefois, à cause de l'utilisation croissante des systèmes informatisés de conduite, on s'intéressera ici à la conception de l'imagerie pour les IHM de ce dernier type de systèmes. Cependant, les résultats de la recherche seront aussi utiles pour la conception d'IHM câblées.

1.3 Objectifs de cette recherche

L'objectif principal de cette recherche est de définir et de tester une méthode pour identifier le type de contenu et l'organisation de l'information à fournir à un opérateur pour surveiller et commander efficacement un système complexe.

On appelle « type de contenu » les catégories d'informations qui seront présentées; par exemple, fournira-t-on des informations sur les composants physiques du processus et sur leurs liens, ou bien des données provenant des diverses mesures prises, ou encore des instructions sur la marche à suivre pour effectuer des manoeuvres sur le processus, ou même une combinaison de ces éléments? On ne se préoccupe donc pas ici des éléments relatifs à la présentation de l'information (p. ex., choix des couleurs, taille des caractères, épaisseur des lignes).

Par ailleurs, on désigne par « organisation de l'information » la structure temporelle à l'intérieur de laquelle le contenu de l'information sera mis à la disposition de l'opérateur.

On vise également à ce que la méthode soit aussi simple que possible à mettre en oeuvre. En effet, les concepteurs de systèmes ne tirent pas toujours partie des recommandations ergonomiques usuelles provenant de la littérature technique ou scientifique, notamment à cause de la difficulté à traduire ces recommandations en exigences de conception. L'exemple suivant, tiré du chapitre 8 de (Chapanis, 1996) illustre une telle recommandation visant un objectif approprié pour la conception d'une IHM, mais qui est difficile à mettre en oeuvre:

> *Control/display ratios for continuous-adjustment controls shall minimize the total time required to make the desired control movement (i.e., slewing time plus fine adjusting time) consistent with display size, tolerance requirements, viewing distance, and time delays.*

Cette recommandation, en apparence détaillée, exige du concepteur un effort d'interprétation considérable que celui-ci ne peut souvent pas consentir, soit parce qu'il ne possède pas la formation requise ou qu'il n'en a pas le temps. L'élaboration de la méthode qui sera proposée devra donc tenir compte de cette difficulté.

1.4 Limites de cette recherche

On a imposé plusieurs limites à cette recherche de façon à pouvoir construire et valider de façon rigoureuse la méthode proposée; une portée trop large aurait en effet rendu très difficile, voire impossible, cette tâche ne serait-ce qu'à cause des moyens financiers et techniques qui auraient été requis.

D'abord, on se restreint à l'étude du poste de travail informatisé d'un opérateur, plutôt qu'à l'ensemble des moyens d'obtenir de l'information auxquels il peut avoir recours

comme les échanges verbaux, l'utilisation de documents en papier et l'inspection visuelle du processus.

Ensuite, on a restreint la portée de cette recherche aux tâches principales de conduite (voir section 1.1) à cause de leur importance pour l'atteinte des buts du système humain-machine.

On a aussi exclu l'effet de la coopération ou de l'équipe de travail. Comme on l'a déjà mentionné, il est fréquent que plusieurs opérateurs travaillent ensemble pour atteindre les buts d'opération. Dans cette recherche, on a choisi de simplifier le problème en se concentrant sur les postes de travail informatisés utilisés par des individus plutôt que sur les moyens destinés à toute l'équipe de travail. Toutefois, comme un opérateur donné est aussi susceptible d'agir individuellement sur un processus même s'il fait partie d'une équipe, la méthode sera vraisemblablement utile, en tout ou en partie, pour la conception des interfaces destinées aux membres d'une équipe de travail.

Par ailleurs, on s'intéresse dans cette recherche aux processus continus, impliquant des évolutions continues de variables, plutôt qu'aux processus discontinus, faisant intervenir des transformations discrètes d'états individuels (Hoc, 1991). On reconnaît que cette distinction n'est pas complètement hermétique car plusieurs types de processus continus ont des éléments discrets (Lennartson, Tittus, Egardt, Pettersson, 1996). On croit toutefois que plusieurs des résultats seront aussi pertinents pour des processus discontinus. De plus, la recherche s'intéresse aux processus variant lentement, soit sur un horizon de plusieurs secondes, minutes ou heures, par opposition à ceux où l'habileté sensori-motrice de l'opérateur est sollicitée de façon intense (p. ex., conduite automobile). Cet intérêt s'explique par le fait que la plupart des processus complexes sont soumis à des perturbations ou des actions causant des changements relativement

lents sauf pour des cas extrêmes où des phénomènes quasi-instantanés peuvent se produire (p. ex., accidents, explosions).

On n'aborde pas non plus, dans le cadre de cette recherche, la question du cycle de vie de la conception d'interface. Plusieurs normes (p. ex., ISO 13407, IEEE 1023) traitent déjà des aspects pertinents comme les tests d'utilisabilité, la vérification, la validation, etc. La méthode qui sera élaborée vise à définir de façon analytique le contenu en information et l'organisation de cette dernière dans l'IHM. Cela n'implique pas qu'une conception itérative n'est plus indiquée, mais plutôt qu'une solution satisfaisante est susceptible d'être obtenue plus rapidement.

Par ailleurs, et bien qu'il ne s'agisse pas à proprement parler d'une limite, on a choisi de valider expérimentalement la méthode proposée en laboratoire. En dépit de l'attrait récent, du moins en Amérique du Nord, pour des études dites « en milieu naturel », une validation expérimentale en laboratoire apparaît mieux adaptée à cause notamment du contrôle qui peut être exercé sur les facteurs pouvant affecter les résultats obtenus.

Enfin, on a choisi de valider la méthode en comparant la performance de sujets exploitant une interface améliorée (c.-à-d., obtenue en utilisant la méthode) à celle de sujets exploitant une interface de référence. Ces deux interfaces étant conçues par le même concepteur, on a donc pu minimiser les différences qui auraient pu relever des méthodes de travail, conscientes ou non, de concepteurs différents. On reconnaît toutefois qu'une fois faite la démonstration que la méthode améliorée permet de concevoir des interfaces mieux adaptées, il pourrait être intéressant de comparer la performance des concepteurs utilisant soit la méthode proposée, soit une autre méthode.

1.5 Organisation de la recherche et de la thèse

Deux prémisses sont à la base de la recherche présentée dans cette thèse. D'abord, et comme on l'a dit précédemment, il n'existe pas de méthode satisfaisante pour identifier le contenu de l'information requise et pour l'organiser de façon adéquate. Toutefois, et comme on le montrera, plusieurs éléments utiles pour l'élaboration d'une méthode peuvent être tirés des travaux qui ont été effectués par les chercheurs.

Ensuite, la conception d'une interface satisfaisante doit tenir compte simultanément des caractéristiques cognitives de l'opérateur (p. ex., ses méthodes de résolution de problèmes), des objectifs d'opération (p. ex., la sûreté, la productivité) et du processus. En effet, les caractéristiques de ce dernier posent des exigences sur les variables qui devront être observées et les commandes qui devront être manipulées, ainsi que sur la façon dont les manoeuvres devront être exécutées. La recherche et la thèse sont donc organisées comme suit:

- Au Chapitre 2:, on analyse diverses méthodes de conception d'IHM ainsi que les résultats obtenus lors de leur validation de façon à en identifier les avantages et les inconvénients. On examine aussi des systèmes d'aide à la gestion de situations incidentelles ainsi que des résultats empiriques ou des propositions faites par différents auteurs. On produit alors une synthèse d'éléments qui devront être inclus dans la méthode qui sera élaborée.

- Au Chapitre 3:, on définit les types d'informations utilisés par un opérateur lors de la conduite d'un processus. On y parvient en examinant de façon détaillée la prise de décision chez les opérateurs, les types de tâches qu'ils effectuent et les informations requises pour soutenir l'exécution de ces tâches. On considère aussi les vues ou modèles de processus que les opérateurs sont amenés à utiliser ou qui sont susceptibles d'être utiles pour exécuter leurs tâches.

- À partir des éléments identifiés dans les chapitres précédents, on complète au

Chapitre 4: la synthèse de la méthode proposée et on montre comment on peut la mettre en oeuvre.

- Au Chapitre 5:, on discute de la validation expérimentale de la méthode proposée pour la conduite en situations normales et on présente les résultats obtenus, alors que les résultats de la validation de la méthode pour la conduite en situation incidentelle sont présentés au Chapitre 6:. On présente aussi dans ce dernier les résultats d'une validation additionnelle, mais non expérimentale, de la méthode; cette validation est basée sur une interface de référence utilisée pour la surveillance d'un processus de grande envergure.
- Au Chapitre 7:, on traite de l'atteinte des objectifs par rapport à l'ensemble des résultats qui ont été obtenus lors des validations expérimentales; on fait aussi diverses autres constatations découlant de ces validations.
- On conclut en décrivant les limites de cette recherche et en identifiant sa contribution à l'avancement de la connaissance. On offre aussi des pistes de recherche qui s'ouvrent à la suite des travaux présentés ici.

CHAPITRE 2: ÉTAT DE L'ART – MÉTHODES DE CONCEPTION

Dans ce chapitre, on examine plusieurs méthodes[5] de conception d'IHM. Comme on le verra, chacune d'entre elles présente des lacunes; toutefois, plusieurs bonnes idées peuvent aussi être identifiées et adaptées pour élaborer une méthode améliorée. On examine aussi des résultats d'expérimentations de moindre envergure et des retours d'expérience et on en tire aussi des éléments qui seront intégrés à la méthode. On a donc examiné chaque méthode en:

- Décrivant ses éléments principaux et en identifiant les situations pour lesquelles elle est appropriée. On classe ces situations comme soit normales (prévues ou imprévues), anormales mais prévues, ou encore anormales et imprévues.
- Identifiant les étapes de sa mise en oeuvre ou, à défaut, des principes ou règles de conception proposés aux concepteurs.
- Décrivant les types d'informations et leur organisation sur les interfaces résultantes et en examinant des résultats de validations expérimentales qui ont eu lieu, le cas échéant.
- Discutant de ses points saillants, de ses avantages et de ses inconvénients.

Dans le cas des expérimentations et des retours d'expérience, on les décrit et on en identifie les résultats pertinents à cette recherche. On synthétise ensuite l'ensemble des résultats obtenus et on en tire des éléments qui contribueront au développement de la méthode qui sera proposée.

---

[5] On définit une méthode comme un ensemble de démarches raisonnées, suivies pour atteindre un but. Dans ce chapitre, on utilisera ce terme pour identifier les différentes façons de concevoir une interface, bien que la portée et le niveau de rigueur des différentes études varient souvent considérablement.

2.1 *La méthode traditionnelle*

2.1.1 Description

Comme on l'a mentionné (voir la section 1.2), il n'existe pas actuellement de méthode appropriée pour la conception d'IHM dans des applications industrielles. Toutefois, on peut identifier un ensemble de pratiques qui sont utilisées de façon plus ou moins ad hoc par les concepteurs industriels pour tenter d'y parvenir. On appellera donc collectivement « méthode traditionnelle » cet ensemble de pratiques; celles-ci sont décrites à la prochaine section. On note que ces méthodes doivent permettre de concevoir des interfaces dont on s'attend qu'elles permettront de traiter les situations normales et anormales (prévues ou imprévues).

2.1.2 Mise en oeuvre

Les pratiques suivantes sont souvent utilisées, individuellement ou combinées, pour concevoir les interfaces utilisées pour la conduite de processus complexes:

- Ré-utilisation, en tout ou en partie, d'imageries qui ont été utilisées dans d'autres applications plus ou moins similaires (Fanchini, 1991). Par exemple, lors de l'implantation d'un nouveau système informatisé de conduite dans une aluminerie, les concepteurs peuvent ré-utiliser des images provenant d'un système de conduite équivalent exploité dans une autre usine du même type, en apportant éventuellement quelques changements aux images de façon à tenir compte des particularités physiques du processus.

- Exploitation d'images ou de composants d'images fournis par les constructeurs des systèmes de conduite (Zwaga et Hoonhout, 1994) ou encore par les fournisseurs de logiciels spécialisés servant à élaborer des systèmes « sur mesure » pour la conduite de processus. Il faut toutefois noter que l'amélioration systématique des imageries par retours d'expérience est, en général, peu pratiquée en industrie. De plus,

plusieurs fournisseurs se limitent à offrir leurs logiciels sans toutefois fournir d'encadrement sur la façon de concevoir des IHM; au plus fournissent-ils quelques exemples réalisés lors d'autres applications de leurs produits. Par ailleurs, et dans les termes d'un de ces fournisseurs (cité dans Johnson, 1997): « ... la plupart (des concepteurs de nos clients) copient les panneaux câblés qu'ils ont déjà ... alors nous ne fournissons pas d'encadrement à la conception... ».

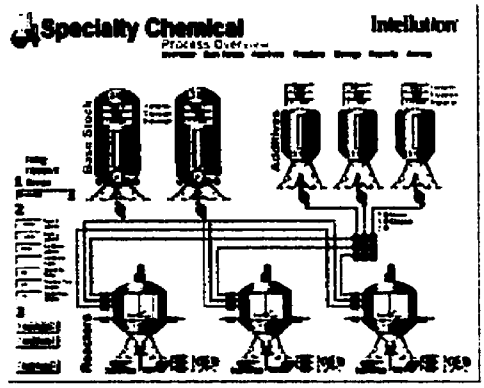
- Selon notre propre expérience, une autre approche consiste à utiliser les diagrammes décrivant les éléments structuraux du processus ainsi que l'écoulement de la masse ou de l'énergie[6] pour définir le contenu des images. Ainsi, les éléments apparaissant sur un diagramme sont susceptibles d'être reproduits dans l'imagerie sous réserve de l'espace disponible et de l'importance, souvent subjective, que les concepteurs ou les représentants d'utilisateurs prévus leur attribuent pour la conduite du processus.

Dans quelques cas, il peut arriver que des concepteurs tiennent compte de recommandations et de règles ergonomiques pour la conception d'éléments d'IHM. Toutefois, les recommandations utilisées sont généralement soit de niveau « lexical » (p. ex., format de graphique) ou touchent des aspects plus généraux de la conception (p. ex., choix des couleurs, choix et taille des polices); il n'existe pas d'encadrement pour choisir le type d'informations devant soutenir optimalement un opérateur dans l'exécution de sa tâche.

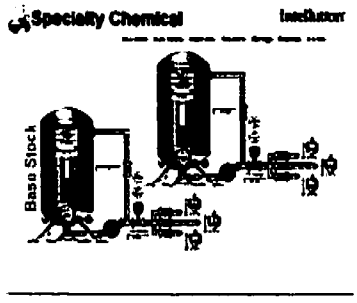
Par ailleurs, et selon notre propre expérience du domaine, les mêmes images sont souvent utilisées pour les divers types d'utilisateurs appréhendés (p. ex., les opérateurs, les superviseurs, le personnel d'entretien). Au plus constatera-t-on des ajouts ponctuels (p. ex., numéros des boucles de régulation) sur certaines des images.

2.1.3 Interfaces résultantes et résultats

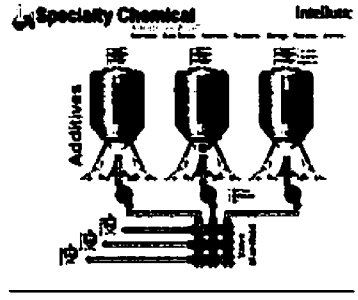
En dépit de la diversité de contenu des imageries existantes, on peut identifier certaines constantes, dont la forte utilisation d'images synoptiques (Fanchini, 1991; Hoonhout et Zwaga, 1993). La figure suivante présente une imagerie typique pour la conduite d'un processus.



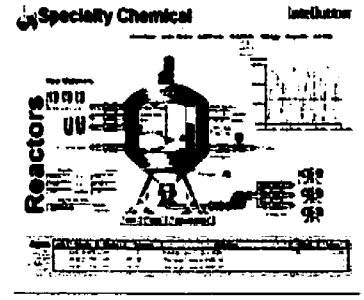
(a) Vue d'ensemble du processus



(b) Réservoirs



(c) Additifs



(d) Réacteur chimique

Figure 2-1: Exemple d'imagerie traditionnelle. [7]

Ce type d'imagerie comporte fréquemment les caractéristiques suivantes:

- Une ou, éventuellement, quelques images principale(s) ser(ven)t à apprécier la

---

[6] On désigne fréquemment ce types de représentations par P&ID, de l'anglais « Piping and Instrumentation Diagram ».
[7] Images tirées du site www.intellution.com.

situation de l'ensemble du processus, tel qu'illustré en (a).

- Des images subordonnées (b, c et d) fournissent plus de détails sur les sous-systèmes composant le système principal.

- Les images décrivent ce à quoi le processus ressemble en en représentant les composants structuraux et leurs liens. Dans ce type d'images, une attention importante est souvent apportée à l'aménagement du contenu des écrans plutôt qu'à l'identification des fins auxquelles ils sont destinés (Hoonhout et Zwaga, 1993; Gaddy, Taylor, Beare, Humphrey, Christiansen et Blanco, 1993).

- En général, ces images ne contiennent que peu ou pas d'informations, du moins sous une forme explicite, portant sur l'atteinte des buts d'opération. Plutôt, on y retrouve fréquemment les mesures brutes disponibles pour la partie du processus qui y est représentée, conformément à la philosophie « une mesure - un affichage » mentionnée à la section 1.2. Dans le cas des vues principales, un sous-ensemble de ces mesures peut être affiché; dans d'autres cas, ces vues principales peuvent ne servir que de moyen de navigation vers les vues secondaires.

- Dans certains cas, on peut combiner des types informations sur les images; par exemple, l'image (d) inclut un synoptique, un graphique de tendances (partie supérieure droite) et une liste de messages (partie inférieure). Ces derniers types d'informations, ainsi que d'autres (p. ex., graphiques à barres, tableaux de données) peuvent aussi être montrés sur des images séparées.

- Un système de gestion des alarmes est souvent utilisé pour produire, afficher et, dans certains cas, classer et filtrer les alarmes relatives à l'atteinte ou au dépassement de seuils limites pour des variables données.

- Dans certains cas spécifiques et relativement rares, on peut trouver, en supplément des images, quelques éléments pour soutenir la gestion des situations anormales tels que :

- La mise à la disposition des opérateurs de procédures de conduite en situations anormales prévues et imprévues (Colqhoun, 1984; ce dernier type de procédures sera discuté plus en détails à la section 3.3.3). La disponibilité de ce type de soutien est toutefois généralement limitée aux domaines dits à risques tels que le nucléaire, l'aéronautique, etc.
- L'inclusion de fiches techniques associées à des alarmes individuelles fournissant à l'opérateur des informations sur les seuils d'alarmes pour une variable, les causes possibles d'une alarme et les mesures à prendre pour gérer cette alarme. Il faut noter que bien que ce type d'informations puisse être très utile, il n'est adapté qu'au traitement d'alarmes individuelles. Il n'offre généralement pas de solution aux situations plus complexes, où le déclenchement d'alarmes individuelles n'est qu'une conséquence à un problème plus important.

- Enfin, la taille des imageries actuelles varie de façon très importante; alors que quelques images peuvent suffire pour un processus simple, on peut retrouver plusieurs centaines, sinon plusieurs milliers d'images pour des processus de plus grande envergure.

Pour les fins de cette recherche, on considérera que les images basées sur l'utilisation de synoptiques (quelquefois appelés schémas mécaniques) sont représentatives des IHM conventionnelles pour la conduite des processus complexes. Il s'agit d'ailleurs du type d'image le plus fréquemment utilisé pour ce type de situations (Pedersen et Lind, 1997).

2.1.4 Discussion

On peut identifier certains avantages pour ce type d'imageries:

- D'abord, le formalisme utilisé (synoptique représentant de façon schématisée les composants du processus et leurs liens) est généralement familier au personnel technique (ingénieurs de processus, personnel d'instrumentation) et aux opérateurs.

- Comme beaucoup d'informations sont montrées (ou du moins accessibles), ce type d'interfaces est susceptible, en principe, de permettre à l'opérateur de faire face à la plupart des situations pouvant se présenter.

- L'élaboration d'images par la ré-utilisation d'éléments provenant d'applications similaires, d'images pré-conçues par les constructeurs des systèmes informatisés de conduite ou même d'images élaborées à partir des diagrammes du processus confèrent une valeur apparente à l'IHM produite.

Cependant, un examen plus approfondi de ce type d'imageries fait apparaître les inconvénients suivants:

- À cause du problème de couplage mentionné à la section 1.1, ces imageries sont souvent mal adaptées pour les opérations requérant la manoeuvre simultanée de plusieurs sous-systèmes, ce qui se produit fréquemment lors des mises en route ou des arrêts de production. De plus, les anomalies affectant plusieurs sous-systèmes peuvent être difficiles à isoler.

- Le recours à la philosophie « une mesure – un affichage » entraîne fréquemment une charge de travail très élevée pour l'opérateur. Cela est d'autant plus vrai que les informations sont rarement organisées de façon à lui permettre d'évaluer l'atteinte des buts d'opération.

- Dans ce type d'imageries, le nombre d'images augmente en fonction directe du nombre de pièces d'équipements composant le processus, ce qui peut amener des difficultés quand l'opérateur doit naviguer entre plusieurs centaines, sinon plusieurs milliers d'images.

- Ces images ne contiennent généralement pas d'informations sur la façon d'exploiter le processus (p. ex., de marche à suivre pour le démarrage ou l'arrêt).

- De plus, les images synoptiques usuelles ne permettent pas, en général, à l'opérateur de se faire une idée complète et correcte des liens entre les variables du processus

d'interfaces (Sanderson, Verhage et Fuld, 1989). Ceci peut alors nuire à l'établissement d'un diagnostic pour une anomalie, et donc à l'élaboration de contre-mesures efficaces. Aussi, et comme nos propres résultats présentés au Chapitre 6: le démontreront, ce type d'image ne permet pas toujours de déceler des anomalies significatives mais qui présentent peu de signes visibles.

- Enfin, et sauf exception, il n'y a pas, en général, de soutien spécifique offert pour les situations imprévues dans ce type d'interfaces; celles-ci doivent donc être utilisées pour la gestion de tous les cas.

2.2 *La méthode EID*

2.2.1 Description

La méthode EID[8] (Vicente et Rasmussen, 1992) est basée sur les travaux de Rasmussen et bénéficie actuellement d'une grande notoriété dans le domaine de la recherche. Elle est basée sur l'utilisation d'une hiérarchie de vues abstraites d'un système (appelée hiérarchie d'abstractions) et du modèle SRK[9]. La figure suivante montre une hiérarchie d'abstractions pour un système électronique quelconque.

---

[8] On a conservé l'acronyme original pour « Ecological Interface Design » (EID); cet acronyme a été adopté par la majorité des auteurs, même francophones.
[9] On utilise l'acronyme original pour « Skill, Rules et Knowledge », qui a aussi été adopté par la majorité des auteurs.

Décomposition / Abstraction	Système	Sous-système	Circuit fonctionnel	Étage	Compo-sant
Finalité					
Fonction abstraite					
Fonction généralisée					
Fonction physique					
Forme physique					

Figure 2-2: Exemple d'hiérarchie d'abstractions.

L'axe vertical correspond à divers niveaux d'abstractions, allant du général au spécifique, dans la représentation que l'opérateur se fait d'un processus donné. Ainsi, on a:

- La finalité du système, qui constitue sa raison d'être (p. ex., objectifs en termes de productivité, de sûreté).
- Les fonctions abstraites correspondant à l'écoulement de la masse, de l'énergie, de l'information dans le système.
- Les fonctions généralisées liées aux boucles de régulation, transferts de chaleur, etc.
- Les fonctions physiques correspondant aux processus électriques, mécaniques, chimiques, etc.
- La forme physique décrivant l'apparence, la localisation, etc.

La hiérarchie d'abstractions correspond à une vue fonctionnelle du processus. Cependant, on la représente souvent de pair avec une décomposition structurelle du processus (sur l'axe horizontal de la figure). Cette décomposition structurelle va aussi du général (le processus dans son ensemble) au particulier (chacun des composants).

Même si les vues fonctionnelles et structurelles sont distinctes, elles sont liées car des éléments structuraux viennent soutenir la réalisation des diverses fonctions. L'enveloppe elliptique apparaissant sur la diagonale dans la figure traduit cette relation, et met en évidence le fait qu'un même élément structurel peut servir à soutenir la réalisation de plus d'une fonction, et que la réalisation d'une fonction peut nécessiter de faire intervenir plusieurs éléments structuraux.

Le modèle SRK (Rasmussen, 1983) tente d'expliquer la performance d'un opérateur en lui attribuant un comportement basé sur des habiletés (« Skills »), des règles (« Rules »), ou des connaissances (« Knowledge »). Ce modèle tient aussi compte de l'interprétation de l'information qui peut être utilisée de façon différente selon le niveau de comportement qu'elle soutient. La figure suivante (traduite et tirée de Rasmussen, 1983) montre une représentation usuelle de ce modèle.

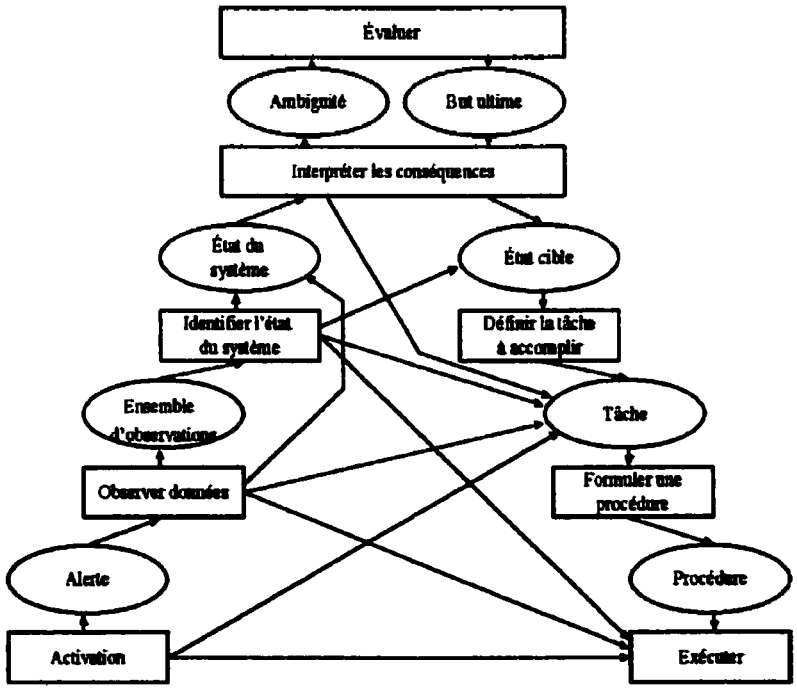


Figure 2-3: Modèle de performance SRK.

Par exemple, un comportement basé sur des habiletés pourrait être déclenché par un stimulus de l'environnement et conduire soit à l'exécution d'une procédure de correction bien connue de l'opérateur, soit induire un état d'alerte le poussant à obtenir des données additionnelles. Ceci peut alors permettre à l'opérateur de choisir et d'exécuter une procédure appropriée, ou encore l'inciter à continuer à identifier plus complètement l'état du système. Au fur et à mesure de sa progression dans le modèle, l'opérateur franchit les étapes menant à un comportement basé sur des règles et, éventuellement, sur des connaissances. De même, la définition des actions à poser peut s'appuyer sur la ré-utilisation d'une procédure existante ou sur l'élaboration d'une nouvelle procédure.

EID a été élaborée pour permettre de soutenir l'exécution des tâches de l'opérateur en situations normales et anormales (prévues et imprévues).

2.2.2 Mise en oeuvre

EID propose trois principes de conception d'IHM (Vicente et Rasmussen, 1992):

- Soutenir le comportement de l'opérateur basé sur les habiletés via des signaux spatio-temporels en lui permettant d'agir directement sur l'affichage; la structure de l'information affichée devrait être isomorphique à la structure des mouvements utilisés par l'opérateur pour commander le système. De plus, favoriser l'utilisation de la manipulation directe (par opposition à d'autres méthodes comme l'exploitation de langages de commande) pour l'utilisation de l'IHM.
- Soutenir le comportement de l'opérateur basé sur les règles en fournissant un pairage entre les contraintes du domaine de travail (ici, le processus) et les signes et indices fournis par l'IHM. Il faut noter ici qu'en dépit de la référence faite à des règles, ce principe n'implique pas le recours à des procédures. Plutôt, les auteurs indiquent que le pairage préconisé entre les contraintes du domaine et les signes fournis par l'IHM à

l'opérateur devraient l'aider à choisir les actions appropriées car celles-ci seront associées à des conditions fondamentales du processus. L'opérateur est donc appelé à élaborer un plan d'action de façon dynamique, selon la situation. Les auteurs expliquent ce choix par la présence possible de « pièges procéduraux » où les opérateurs peuvent être amenés à poser des actions de façon routinière alors que le contexte peut ne pas être approprié pour ces actions (Rasmussen et Vicente, 1989).

- Soutenir le comportement de l'opérateur basé sur les connaissances en représentant le domaine de travail sous forme d'une hiérarchie d'abstractions réputée correspondre à une externalisation d'une image complète des connaissances requises pour comprendre le système et faire face aux situations imprévues.

Ces trois principes de conception constituent l'essentiel de la méthode; en conséquence, un concepteur doit, à l'état actuel d'avancement d'EID, s'en contenter pour concevoir l'IHM.

2.2.3 Interfaces résultantes et résultats

La figure suivante montre une interface conventionnelle et une interface EID pour un processus relativement simple, telles qu'adaptées de (Vicente, Christoffersen et Pereklita, 1995).

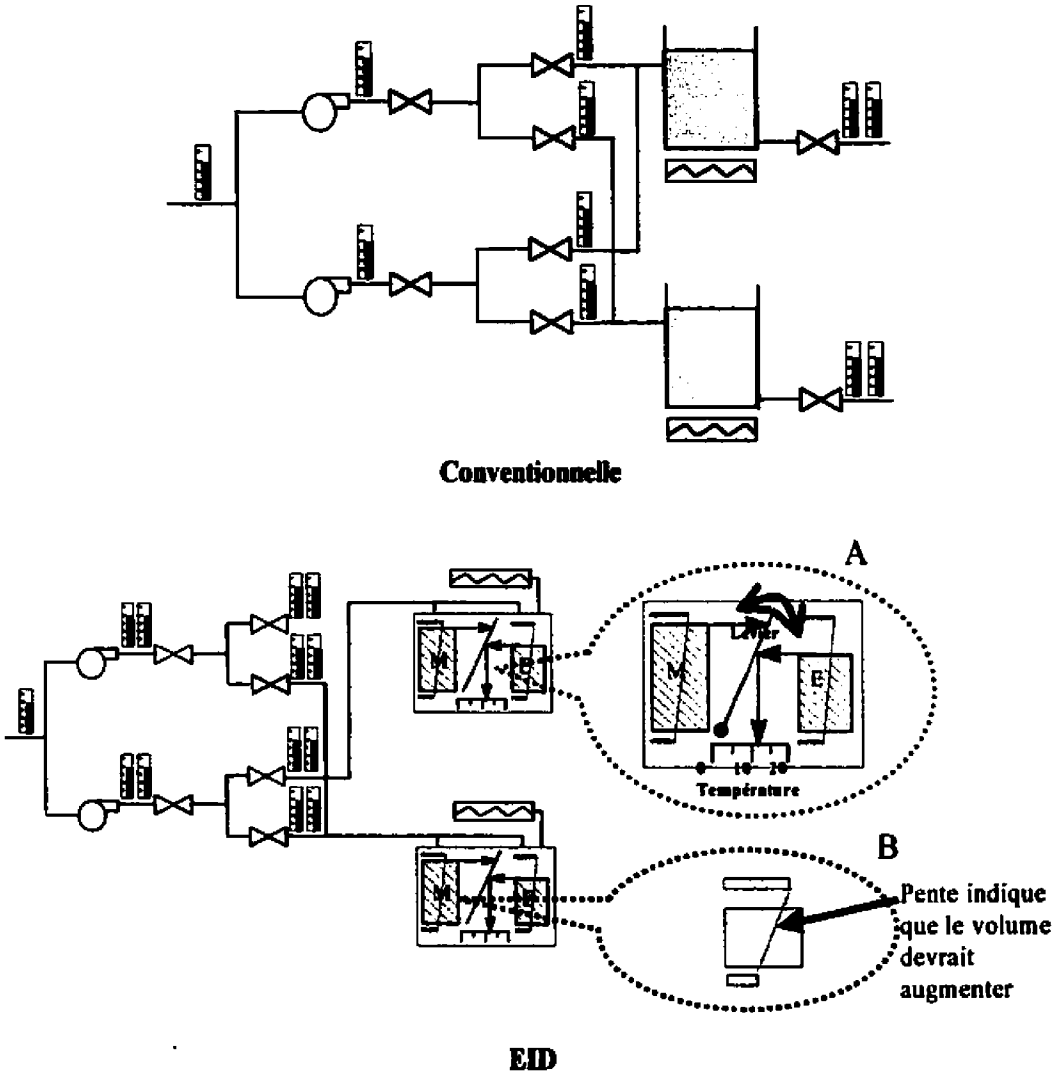


Figure 2-4: Interface de référence et interface EID correspondante.

Le processus est composé de pompes, de réservoirs, de chauffe-eau et d'éléments de mesure; l'opérateur doit atteindre des objectifs de température et de débit pour chacun des réservoirs. L'interface conventionnelle comporte des caractéristiques similaires à celles que l'on retrouve dans les interfaces utilisant des synoptiques du processus (voir la section 2.1.3).

L'interface de type EID contient une représentation des composants reliés à l'écoulement de la masse (vannes, pompes, réservoirs) et de l'énergie (chauffe-eau), des liens entre des variables du processus (le débit, le niveau, la température et le chauffage), ainsi que plusieurs informations relatives à l'atteinte des buts d'opération (p. ex., indicateurs de débit et de température). En particulier, un dispositif animé (voir agrandissement A dans la figure) permet à l'opérateur de connaître le résultat d'une variation de la masse ou de l'énergie sur la température du liquide; par exemple, une diminution de la masse (ou du niveau) dans le réservoir sans augmentation du niveau d'énergie entraîne une rotation horaire du levier, lequel vient modifier l'indication de la température. De plus, un dispositif montre le comportement normal du processus suite à des manipulations des débits ou du chauffage (voir agrandissement B dans la figure); la pente de la ligne joignant les deux graphiques à barres horizontales correspondant aux débits d'entrée et de sortie du réservoir indique que le volume devrait normalement augmenter ou diminuer suite à un changement de débit.

La méthode EID a été soumise à plusieurs validations expérimentales en laboratoire. On résume ici les principaux résultats de ces validations:

- Lors d'une expérimentation (Vicente et al., 1995), on a comparé l'habileté de deux groupes de sujets exploitant une interface traditionnelle et une interface EID. Les groupes comportaient des sujets sans formation en sciences ou en génie (appelés ici les novices) et d'autres qui avaient une formation en génie mécanique ou nucléaire (appelés ici les experts). L'expérimentation consistait à montrer à chaque sujet et durant une période d'environ 30 secondes une situation donnée au moyen de l'une ou l'autre des interfaces; par la suite, l'essai était arrêté et le sujet devait identifier les valeurs de toutes les variables du processus, ainsi que déterminer s'il y avait une panne et la décrire, le cas échéant. Les résultats indiquent que les experts ont eu une meilleure performance globale que les novices; toutefois, aucun des experts n'a eu une performance parfaite. De plus, les experts exploitant une interface EID ont eu

une meilleure performance que ceux exploitant une interface traditionnelle; il n'y a toutefois pas eu de différence pour les novices.

- Dans un second volet de l'expérimentation précédente, les chercheurs ont tenté de mieux comprendre l'effet de l'expertise des sujets sur leur performance lors de l'exploitation d'une interface EID. Plusieurs informations concernant cette expertise (p. ex., éducation, expérience avec le processus, expérience avec l'interface EID) furent collectées. Des scénarios furent présentés aux sujets durant environ 60 secondes; les sujets devaient alors identifier l'état du processus (situation normale ou panne). Les résultats indiquent que les éléments d'expertise les plus fortement corrélés avec la performance des sujets sont l'expérience avec le processus, celle avec l'interface EID et l'éducation. De plus, et comme EID vise à soutenir les situations anormales imprévues, une analyse a été effectuée pour déterminer comment les sujets exploitaient l'information. La stratégie amenant les meilleurs résultats a consisté à examiner de l'information à un niveau d'abstraction élevé et à progresser vers de l'information de plus en plus détaillée.

- Lors d'une autre expérience, deux groupes de sujets ont exploité une interface traditionnelle et une interface EID pour effectuer plusieurs manoeuvres sur un processus; ces manoeuvres incluaient des démarrages, des arrêts et des changements de consignes de production (Pawlak et Vicente, 1994). Ces manoeuvres eurent lieu lors d'essais d'une durée d'une heure sur une période de plusieurs jours. De plus, des pannes furent introduites lors de certains des essais; les sujets devaient alors détecter la présence de la panne, en diagnostiquer la cause et en compenser les effets. Les sujets eurent l'occasion de se familiariser avec le processus en effectuant plusieurs essais d'entraînement. Enfin, durant certains des essais, les sujets durent effectuer une tâche secondaire devant permettre d'évaluer la nature des ressources cognitives mises en cause par chaque type d'interface. Deux types de tâche secondaires furent

utilisées, soit une tâche de nature verbale et une tâche de nature spatiale[10]. Les principaux résultats indiquent que :

- Les sujets exploitant l'interface EID ont mieux diagnostiqué les pannes que ceux exploitant l'interface traditionnelle, mais il n'y a pas eu de différence significative entre les groupes de sujets par rapport au temps requis pour stabiliser le processus après une panne, que celle-ci ait été détectée ou non.
- Un problème inattendu avec l'interface EID est survenu puisque plusieurs des sujets utilisèrent de façon erronée une des indications fournies par l'interface lors de la détection de pannes (dispositif montré à l'agrandissement B de la Figure 2-4). De plus, plusieurs sujets ont éprouvé de la difficulté à détecter certaines des pannes car ils ne disposaient pas d'informations sur les évolutions historiques (au cours des minutes précédentes) de certaines variables.
- Une interface EID taxe plus lourdement les ressources cognitives de nature spatiale, alors qu'une interface traditionnelle est plus exigeante quant aux ressources cognitives verbales.
- Il n'y a pas eu de différences significatives dans la performance des sujets utilisant l'une ou l'autre interface pour les tâches de démarrage, arrêt et changements de niveaux de production.

• Enfin, une étude longitudinale a permis de comparer la performance de sujets exploitant une interface traditionnelle et une interface EID (Christoffersen, Hunter et Vicente, 1996) au cours d'une période de près de six mois. Lors de cette étude, deux groupes de sujets ont utilisé respectivement une interface traditionnelle et une

---

[10] On distingue souvent les tâches dites spatiales (requérant de l'opérateur qu'il pose des jugements sur les translations ou les rotations d'objets) et celles dites verbales (associées à du raisonnement sur des symboles). Par exemple, une tâche de calcul mental est de nature verbale, alors que la prédiction de l'évolution des variables sur un graphique de tendances est plutôt de nature spatiale. La dichotomie entre ces catégories n'est pas entièrement étanche, cependant.

interface EID pour effectuer des tâches de démarrage, d'arrêt et de changements de consignes de production. Les résultats montrent que:

- En termes de durée totale des essais, du temps requis pour effectuer les changements de consigne et des arrêts de production, les sujets exploitant l'interface EID ont eu une variance moins élevée que ceux exploitant l'interface traditionnelle. Toutefois, pour le démarrage, les sujets exploitant l'interface traditionnelle ont eu une variance moins élevée.
- Les sujets exploitant l'interface traditionnelle ont aussi été plus rapides pour les tâches d'arrêt du processus.
- Les sujets exploitant l'interface EID ont contrôlé la température de façon plus précise que ceux exploitant l'interface traditionnelle, même après un grand nombre d'essais.
- La performance en terme du temps moyen requis pour compléter les essais a été légèrement meilleure pour les sujets exploitant l'interface EID au début de la période d'essais; par la suite, toutefois, les sujets exploitant l'interface traditionnelle ont acquis un avantage. Vers la fin de l'étude, les deux groupes avaient une performance équivalente.

2.2.4 Discussion

En principe, la combinaison d'informations provenant d'un modèle intégré du processus et des buts d'opération (la hiérarchie d'abstractions) avec les besoins en informations identifiés à partir du modèle SRK devrait procurer plusieurs avantages à une interface de type EID. En particulier, une telle interface devrait soutenir adéquatement un opérateur lors de situations normales et anormales, que ces dernières soient prévues ou imprévues. De façon générale, les résultats expérimentaux montrent un avantage pour une interface

EID dans le cas de la détection et du diagnostic de pannes; toutefois, cet avantage est soumis aux contraintes suivantes :

- Il semble qu'une connaissance théorique du domaine soit requise pour bénéficier des avantages d'une interface EID.
- Un des types de dispositifs de présentation d'informations utilisé dans l'interface EID a induit des erreurs d'interprétation chez les sujets ayant participé à une des validations. Or, une interface EID doit expliciter les états et contraintes du processus de façon à permettre à l'opérateur d'identifier et de poser les actions nécessaires à l'accomplissement de sa tâche (second principe, voir section 2.2.2). On peut donc s'interroger sur la puissance de cette approche car dans un processus complexe, plusieurs types de dispositifs, présentant chacun un niveau de complexité donné, sont susceptibles d'être utilisés pour montrer ces informations.

Pour les tâches liées à l'atteinte de nouveaux objectifs de production en situations normales (p. ex., démarrage, arrêt, changement de consignes), l'utilisation d'une interface EID a permis de rendre plus constante la durée requise pour effectuer ce type de tâches; il n'y a pas eu d'autres améliorations de la performance des sujets.

Les trois principes de conception proposés par EID (voir section 2.2.2) sont aussi très vagues et laissent une place considérable à l'interprétation; ils ne sont donc pas directement exploitables par un concepteur d'IHM. Par exemple, on peut vouloir utiliser les principes de conception d'EID pour un petit processus où toute l'information tiendra sur une image; cependant, les principes ne fournissent pas d'encadrement pour les cas où plusieurs images pourraient être nécessaires (Dinadis et Vicente, 1996). Un autre problème, plus fondamental, implique le choix des relations et des contraintes du processus qui seront mises en évidence. Ainsi, seules certaines des relations entre les variables du processus ont été explicitées dans l'interface EID qui a été évaluée (p. ex., les relations entre un changement de masse et d'énergie, et les variations de température résultantes). Il existe toutefois de nombreuses autres relations entre les variables qui

peuvent se révéler toutes aussi importantes pour l'opérateur. Ainsi, le débit à travers une vanne, pour une ouverture donnée, est proportionnel à la racine carrée de la pression appliquée à la vanne comme le montre la figure ci-contre (p. 170, Weber, 1988). Pour une vanne utilisée à la sortie d'un réservoir, la pression est elle-même proportionnelle à la hauteur du liquide dans le réservoir. Une même commande sur la vanne aura donc un effet différent sur le processus, selon le niveau dans le réservoir. La question qui se pose ici est « Quelles sont les relations et contraintes du processus qui doivent être mises en évidence? ». Il semble très difficile d'expliciter toutes les relations, ne serait-ce qu'à cause de leur nombre et de la difficulté à les représenter toutes, et ce, même sur une surface de présentation de grandes dimensions.

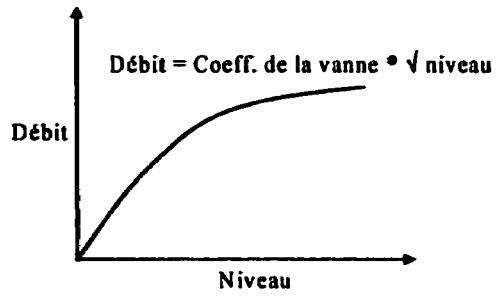


Figure 2-5: Relation entre débit et niveau.

Par ailleurs, d'autres auteurs ont montré que le type de tâches conditionne le type d'informations requis pour l'accomplir (Landerweerd, 1979 ; Vermeulen, 1987). Toutefois, les principes de conception de EID sont muets sur ce lien entre les types de tâches à supporter (par exemple, surveiller un processus, diagnostiquer un problème, effectuer des commandes) et les caractéristiques de l'interface résultante.

EID exclut aussi l'intégration de connaissances procédurales dans l'IHM en vertu du second principe de conception (voir section 2.2.2); ceci est aussi cohérent avec la philosophie selon laquelle une interface EID est conçue en fonction des finalités du processus et non selon les tâches de l'opérateur (Vicente et al., 1995). Or, il semble avantageux d'exploiter dans une IHM des procédures ou plans d'opération existants

reflétant l'expérience accumulée ou ayant été mis au point et validés pour faire face à des situations normales ou anormales prévues.

Enfin, certaines des informations nécessaires selon la méthode EID pour alimenter les calculs liés à l'écoulement de la masse et de l'énergie peuvent être difficiles à obtenir, à cause notamment de l'indisponibilité et du manque de précision des instruments requis (Tay, 1996).

2.3 *La méthode IMAC*

2.3.1 Description

La méthode IMAC[11] (Thurman, 1997) est une méthode récente de conception d'IHM; elle succède à la méthode OFM[12] (Mitchell et Miller, 1986). IMAC constitue une extension intéressante à OFM car alors que cette dernière avait été utilisée surtout pour des tâches de commande, IMAC permet de concevoir des interfaces adaptées à la fois à des tâches de surveillance et de commande. Elle ré-utilise toutefois le modèle qui avait été développé par OFM, soit une représentation détaillée des buts, des fonctions et des tâches de l'opérateur sous forme d'un réseau d'automates à états finis et d'une fonction de contrôle des transitions entre les états des automates. Les automates contiennent l'ensemble des actions (appelées fonctions) possibles de l'opérateur ainsi que des contraintes et des éléments du processus conditionnant l'exécution de ces actions. Les auteurs à l'origine d'OFM suggèrent que ce modèle peut correspondre au modèle mental que les opérateurs ont du processus (Mitchell et Miller, 1986).

IMAC permet de concevoir des interfaces pour les situations normales et les situations anormales mais prévues.

---

[11] De l'anglais « Interactive Monitoring and Control » (IMAC).

2.3.2 Mise en oeuvre

La mise en oeuvre de la méthode IMAC est guidée par une suite d'étapes:

- D'abord, le concepteur construit un modèle normatif des tâches de l'opérateur à l'aide du formalisme OFM.
- Parallèlement avec l'élaboration du modèle normatif, une analyse du flux d'informations entre les activités de l'opérateur est utilisée pour identifier l'information requise par les tâches de surveillance. Ceci complète le modèle normatif des opérations car celui-ci s'intéresse surtout aux tâches de commande.
- La prochaine étape consiste à intégrer le modèle normatif et le modèle du flux d'informations pour identifier les exigences de chaque tâche en termes des informations et des commandes requises.
- La dernière étape consiste à concevoir l'IHM à partir de l'information collectée durant les étapes précédentes. L'exécution de cette étape est facilitée par l'exploitation des principes de conception (traduit de Thurman, 1997):
  1. Fournir des opportunités évidentes pour l'action qui correspondent aux besoins identifiés dans le modèle normatif; en particulier, identifier et soutenir les activités cognitives que l'opérateur doit exécuter pour surveiller le processus.
  2. Emmagasiner l'information importante dans l'interface et la fournir à l'opérateur au moment opportun; réaliser les calculs nécessaires pour fournir l'information requise par l'opérateur pour surveiller le système.
  3. Utiliser un modèle normatif des fonctions de l'opérateur pour identifier ses besoins d'informations et de commandes. Fournir les informations requises dans l'interface au moment et sous la forme appropriés.
  4. Fournir les affichages intégrant la surveillance et la commande soutenant l'exécution des étapes d'une tâche, ainsi que l'information requise pour surveiller

---

[12] De l'anglais « Operator Function Model » (OFM).

et évaluer l'exécution de ces étapes.

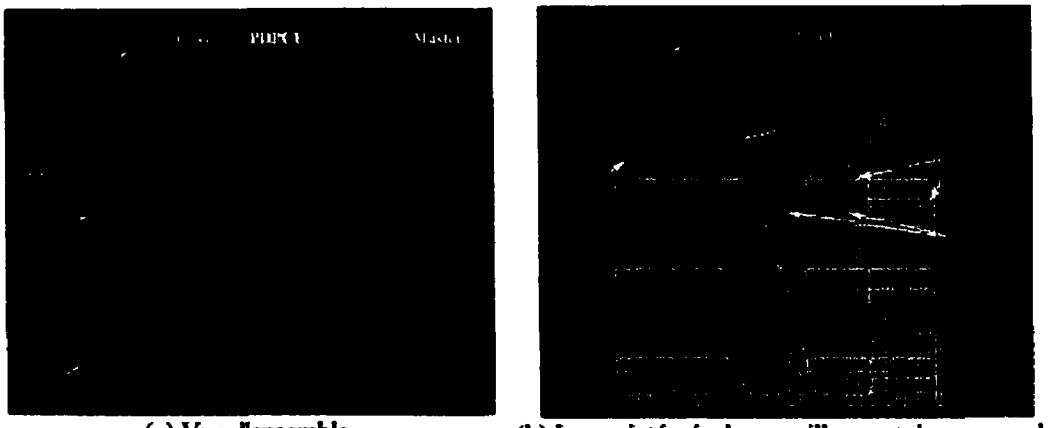
5. Utiliser les contraintes sur les commandes de l'interface pour communiquer les contraintes sur la surveillance et la commande du système.
6. Fournir des vues d'ensemble montrant l'état des sous-systèmes clés, identifiant les sous-systèmes critiques nécessitant de l'attention et montrant l'état des opérations.
7. Toujours laisser une méthode à l'opérateur lui permettant d'accéder à toute information disponible et d'exécuter toute commande.
8. Identifier et comprendre les attentes de l'opérateur par rapport à la conception de l'interface et à l'interaction qu'elle doit soutenir; éviter de violer les normes de la culture des opérations.

2.3.3 Interfaces résultantes et résultats

Lors d'une validation expérimentale, IMAC fut utilisée pour améliorer les images de l'interface existante d'un système de contrôle terrestre de satellites de communication. La figure suivante montre un exemple d'image utilisée dans l'interface originale (note: cette image a été obtenue, sous forme électronique, de Thurman, 1997 et la résolution de l'image originale ne permet pas d'obtenir une meilleure qualité; elle n'est donc fournie que pour donner un aperçu du type d'image utilisée). On y retrouve un ensemble de mesures (environ 12 images de ce type sont utilisées, et chacune affiche entre 40 à 60 mesures).

Figure 2-6: Exemple d'image avant l'utilisation d'IMAC.

Les deux figures suivantes montrent deux images (aussi tirées de Thurman, 1997) pour lesquelles la méthode IMAC a été utilisée.



(a) Vue d'ensemble (b) Image intégrée de surveillance et de commande

Figure 2-7: Exemples d'images produites avec IMAC.

Dans l'image (a), on retrouve:

- Une vue d'ensemble d'un sous-système (voir principe 6, section précédente).
- Des boutons comportant un codage en couleurs montrant l'état des sous-systèmes associés et permettant d'accéder aux images correspondantes (principe 6).
- Une fonctionnalité permettant de « traîner et déposer » une variable sur un graphique de tendances dynamique (identifié comme « dynamic stripchart » dans la figure) (principe 1).

Dans l'image (b), qui correspond à une procédure informatisée, on a:

- Des boutons comportant un codage en couleurs montrant l'état des autres images de surveillance et de commande et permettant d'y accéder (principe 6).
- Les étapes requises pour exécuter des tâches de commande importantes ainsi que les informations de surveillance requises pour ces tâches (principes 2 et 4).
- Des boutons, activés ou rendus inactifs, selon les besoins d'exécution de la tâche (principe 5).

Lors d'une validation expérimentale d'IMAC, on compara la performance d'opérateurs expérimentés exploitant l'interface existante ou une interface améliorée au moyen d'IMAC. Huit scénarios représentatifs des tâches usuelles des opérateurs furent utilisés pour l'étude; lors de ces scénarios, les opérateurs firent face à huit pannes, effectuèrent une tâche de commande ainsi que plusieurs tâche connexes (p. ex., enregistrement d'informations). Un scénario typique durait environ 10 minutes, soit la durée de ce genre de tâche en situation réelle. Les résultats sont les suivants:

- Les délais de détection de pannes sont plus courts et les taux de détection plus élevés avec l'interface IMAC, comparativement à l'interface existante.
- Les sujets commettent moins d'erreurs dans l'exécution des étapes des tâches de commande avec l'interface IMAC.
- Les sujets exécutent les étapes des tâches de commande plus rapidement avec l'interface IMAC.

2.3.4 Discussion

L'analyse des informations disponibles sur IMAC indique que:

- La méthode intègre la notion de tâche mais les principes de conception offerts ne permettent pas de définir le type de contenu (au sens défini à la section 1.3) le mieux adapté pour en soutenir optimalement l'exécution.
- La méthode exploite un modèle OFM; ce dernier est basé sur un modèle normatif de la tâche de l'opérateur, ce qui implique que les tâches requises pour traiter les situations imprévues dans le modèle ne sont pas (ni ne peuvent être), par définition, soutenues par l'interface. Ceci constitue une lacune fondamentale pour cette méthode.
- Le fardeau du choix et de la mise en oeuvre des principes de conception est laissé au concepteur. Ce dernier doit donc choisir et agencer ces principes « à la pièce », selon

son jugement. Cette mise en oeuvre est rendue encore plus délicate du fait que certains de ces principes sont assez vagues (p. ex., un extrait du principe 1 indique que le concepteur doit « ... identifier et soutenir les activités cognitives que l'opérateur doit exécuter pour surveiller le processus... »).

2.4 *La méthode de Woods et Roth*

2.4.1 Description

Ces auteurs ont présenté une étude de cas détaillée du démarrage d'une bouilloire par des opérateurs d'une centrale nucléaire. Bien qu'il ne s'agisse pas à proprement parler d'une nouvelle méthode de conception d'IHM, leur étude met en évidence l'utilisation de certains types d'informations spécifiques à la conception d'IHM (Roth et Woods, 1988; Woods et Roth, 1988). L'étude concernait la mise en marche du processus illustré à la figure suivante.

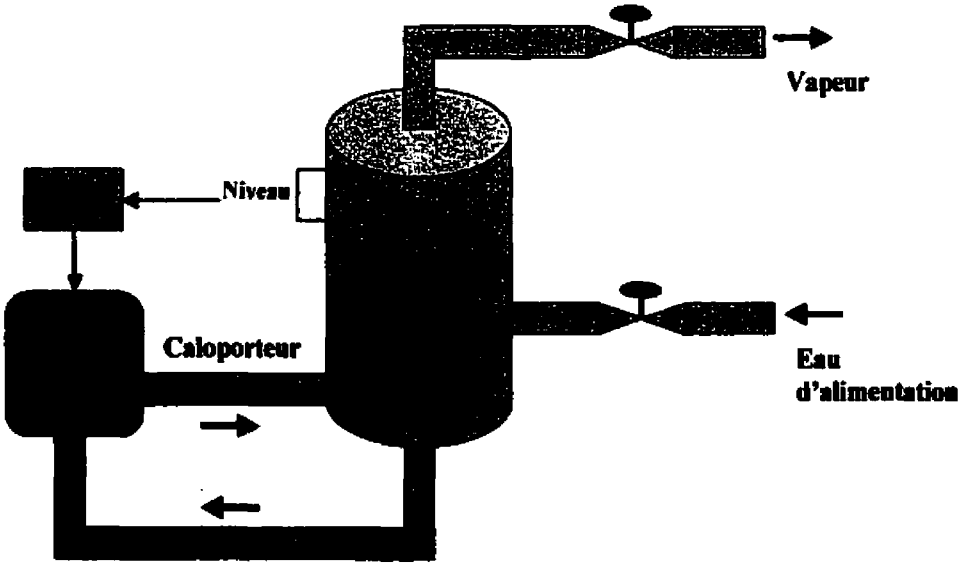


Figure 2-8: Processus pour le cas de Woods et Roth.

Il s'agit d'une bouilloire (aussi appelée « générateur de vapeur ») utilisée dans de nombreux processus industriels (ici, une centrale nucléaire). On achemine à la bouilloire

de l'eau d'alimentation qui est réchauffée par l'énergie provenant du caloporteur. Le processus produit de la vapeur. La mise en marche de ce type de bouilloire est une tâche très difficile, notamment à cause des éléments suivants:

- La présence d'un système de sûreté exige que le niveau soit entre des limites très étroites, à défaut de quoi la source de chaleur (ici, le réacteur nucléaire) est arrêtée automatiquement.
- Des phénomènes transitoires particuliers existent pour ce processus. D'abord, le phénomène de contraction qui se produit lorsque 1- le niveau de liquide dans le réservoir est trop bas, 2- l'opérateur ajoute de l'eau d'alimentation, 3- de façon transitoire, l'ajout d'eau d'alimentation relativement plus froide que celle déjà contenue dans la bouilloire cause une contraction du mélange bi-phasé (liquide et vapeur) dans cette dernière et donc une diminution temporaire du niveau mesuré du liquide; cette diminution du niveau mesuré se corrigera dès que l'eau d'alimentation se sera réchauffée. L'effet inverse (expansion) se produit lorsque le niveau est trop élevé et que l'on tente de diminuer l'arrivée de l'eau d'alimentation; la diminution de la masse dans la bouilloire combinée à une même quantité d'énergie à convertir entraîne une augmentation du niveau mesuré.
- La forte interrelation fonctionnelle entre les éléments du processus.

Dans leur étude, les auteurs proposent que deux étapes importantes soient franchies lors de l'identification du soutien requis à l'opérateur pour l'exécution de ses tâches, soit:

- Décrire les exigences de la tâche (p. ex., les caractéristiques du processus qui posent des contraintes à l'exécution de la tâche) par rapport à un agent donné (humain ou machine). Cette description est obtenue au moyen d'une décomposition fonctionnelle du système en termes de buts, sous-buts et fonctions, et en leur attribuant des critères de succès. Les auteurs appellent « modèle de compétence » cette description et soutiennent que celui-ci est important à la fois pour mieux comprendre le travail des opérateurs et leurs contraintes, comme véhicule de communication, et comme moyen

d'identifier les critères de réussite ou d'échec des fonctions et buts. Les auteurs avaient identifié comme lacune le fait que l'interface originale (sur laquelle on ne dispose pas ici d'autres informations) ne donnait pas l'information requise pour évaluer le succès ou l'échec de l'atteinte des buts. Une autre constatation est le fait que selon la situation (p. ex., démarrage, production normale, arrêt), les buts qui sont pertinents pour l'atteinte des objectifs peuvent varier.

- Décrire les stratégies utilisées par les opérateurs au moyen d'une analyse de leurs activités. Les auteurs appellent « modèle de performance » cette description qui correspond à un modèle de la tâche tel qu'on le définit classiquement. Lors de l'élaboration de ce modèle, les auteurs ont fait ressortir plusieurs différences entre les experts et les novices. Ainsi, les difficultés de ces derniers à anticiper les changements ainsi que les interactions entre leurs différentes actions sont apparues clairement; de plus, les experts étaient particulièrement habiles à compléter leurs informations sur l'état du processus, éventuellement au moyen de perturbations mineures qu'ils introduisaient pour en évaluer les impacts.

En raison des types de modèles élaborés, cette méthode est, du moins théoriquement, en mesure de traiter les cas normaux et anormaux prévus. De plus, en exploitant toutes les propriétés du modèle de compétence, la méthode permet, en principe, d'identifier les fonctions qui pourraient être menacées même si ces menaces n'ont pas été prévues initialement. De la même façon, ce modèle pourrait aussi être exploité pour prédire la conséquence de la défaillance d'une des fonctions. Toutefois, l'information fournie ne permettrait pas, en général, d'élaborer les contre-mesures appropriées pour les cas anormaux imprévus.

2.4.2 Mise en oeuvre

L'étude ne propose pas d'étapes pour mettre en oeuvre la méthode qui est proposée autres que l'élaboration des modèles de compétence et de performance qui ont été identifiés à la section précédente.

2.4.3 Interfaces résultantes et résultats

L'image suivante, tirée de (Woods et Roth, 1988) montre une des images de l'interface résultante.

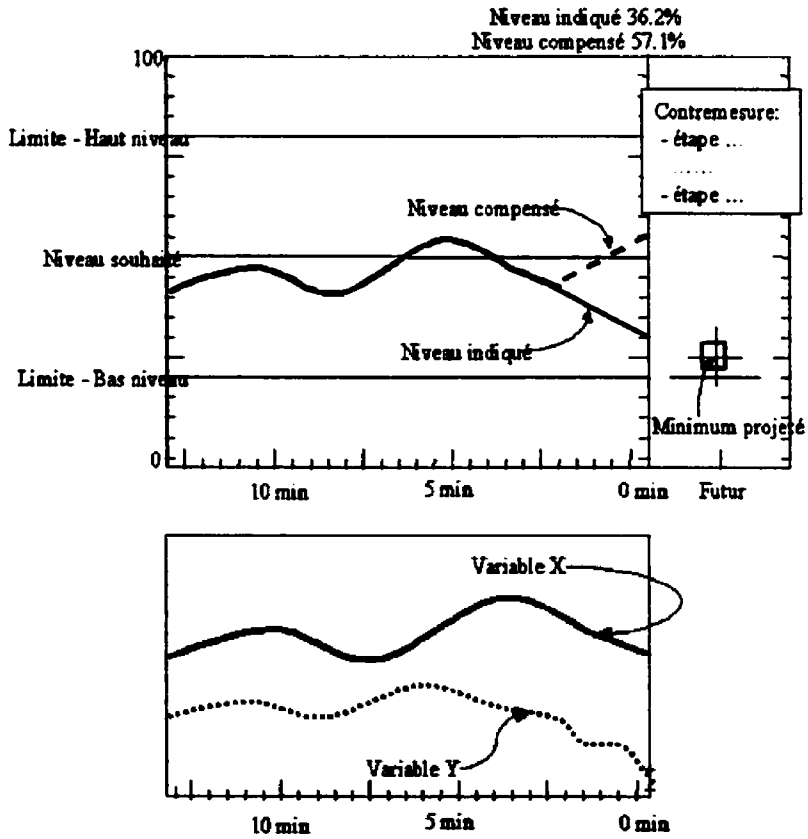


Figure 2-9: Exemple d'image pour la méthode de Woods et Roth.

L'interface comporte:

- Une première fenêtre (partie supérieure de l'image) contenant:

- une zone où des graphiques de tendances montrent l'évolution de la variable liée à l'atteinte du but principal (maintien du niveau à l'intérieur des limites),
- une zone proposant à l'opérateur une marche à suivre dans l'éventualité d'une menace à l'atteinte du but (partie supérieure droite), et
- une zone décrivant l'évolution prévue lors des cinq prochaines minutes (sous la zone contenant la marche à suivre en cas de menace à l'atteinte des buts).

- Une seconde fenêtre (partie inférieure de l'image) montrant des graphiques de tendances où l'opérateur peut évaluer l'évolution des variables affectant le but principal. De façon équivalente, ces variables correspondent à la valeur des sous-buts dont dépend le but principal. Dans le cas du niveau dans une bouilloire, ces sous-buts pourraient être, par exemple, le maintien du débit d'alimentation en eau de la bouilloire et le maintien du débit de vapeur.

Dans cette image, il est donc possible pour l'opérateur de détecter une menace à l'atteinte des buts poursuivis et d'en diagnostiquer la cause en terme de menace à un des sous-buts qui lui est relié. Par exemple, dans la figure précédente, une variation du niveau indiqué serait expliquée par une variation d'une des variables associées aux sous-buts (variable X ou Y).

2.4.4 Discussion

À partir de l'examen de cette approche, on retient les éléments suivants:

- Intégration d'un modèle de compétence et d'un modèle de performance (ou, en d'autres termes, d'un modèle fonctionnel du processus et d'un modèle de la tâche de l'opérateur). En ce sens, l'approche préconisée par les auteurs combine des éléments tirés des méthodes EID et IMAC.
- Présentation de graphiques de tendances et prédiction de l'évolution à court terme des variables.

- Fourniture d'une marche à suivre (ou procédure) pour contrer une menace courante ou appréhendée.

En dépit de la portée de l'analyse réalisée et de l'élaboration d'une interface incorporant plusieurs caractéristiques justifiées par cette analyse, il n'y a pas de résultats expérimentaux permettant de déterminer si les intuitions des auteurs quant à la conception de l'interface améliorée étaient justifiées. Enfin, l'étude ne fournit pas d'informations sur les étapes à franchir pour identifier et organiser les types d'informations requises dans l'interface.

2.5 *Le système Predex*

2.5.1 Description

Predex est un générateur de système expert d'aide à la conduite lors de situations anormales pour les applications de contrôle de processus (Gambiez, Kolski, Tang et Millot, 1991). Il comporte des modules de:

- Perception et traitement des données.
- Diagnostic superficiel et profond. Ce module exploite à la fois des règles de production du type « Si... alors .... » et une combinaison de représentations de connaissances sur le processus de type structurelles, causales et qualitatives.
- Prédiction de l'évolution du processus.
- Gestion de l'interface humain-machine. Ce dernier module est basé sur un modèle de coopération humain-machine et sur la prise en compte des diverses tâches d'un opérateur. Dans Predex, on distingue d'abord deux types de situations:
    - Celles où le processus se comporte normalement et où l'opérateur effectue des tâches de surveillance et d'optimisation.

- Celles où le processus se comporte anormalement et où l'opérateur doit effectuer des tâches de détection d'anomalie, de diagnostic, d'élaboration d'un plan approprié, et de mise en oeuvre de ce plan.

Par ailleurs, comme Predex fournit un avis ou des conseils à l'opérateur, il est nécessaire qu'il dispose de l'information requise sur l'anomalie et sur le plan à proposer pour rétablir la situation et qu'il puisse expliquer son raisonnement de façon efficace. Les modules de diagnostic et de prédiction précédents fournissent alors les informations requises. Pour communiquer ces informations à l'opérateur et pour expliquer ses conclusions, Predex s'appuie sur le modèle SRK décrit précédemment. Ainsi, le système est en mesure d'offrir:

- des informations superficielles satisfaisant immédiatement l'opérateur (niveau S),
- des informations intermédiaires (niveau R),
- des informations fondamentales l'aidant à effectuer lui-même le diagnostic proposé, ou à comprendre celui qui lui a été proposé, et à effectuer la planification requise.

Ce projet n'a malheureusement pas pu être mené à terme[13], le commanditaire industriel impliqué n'ayant pu poursuivre ses opérations. Predex est donc resté à l'état de projet et n'a pas été déployé industriellement; les informations disponibles sont donc très limitées par rapport aux éléments pertinents à cette recherche.

2.5.2 Mise en oeuvre

Il n'existe pas, à notre connaissance, de méthodologie de mise en oeuvre d'une méthode de conception d'IHM pour l'implantation du système Predex.

---

[13] Communication personnelle de Christophe Kolski, Laval, 1998.

2.5.3 Interfaces résultantes et résultats

La figure suivante montre des images utilisées dans l'IHM de Predex.

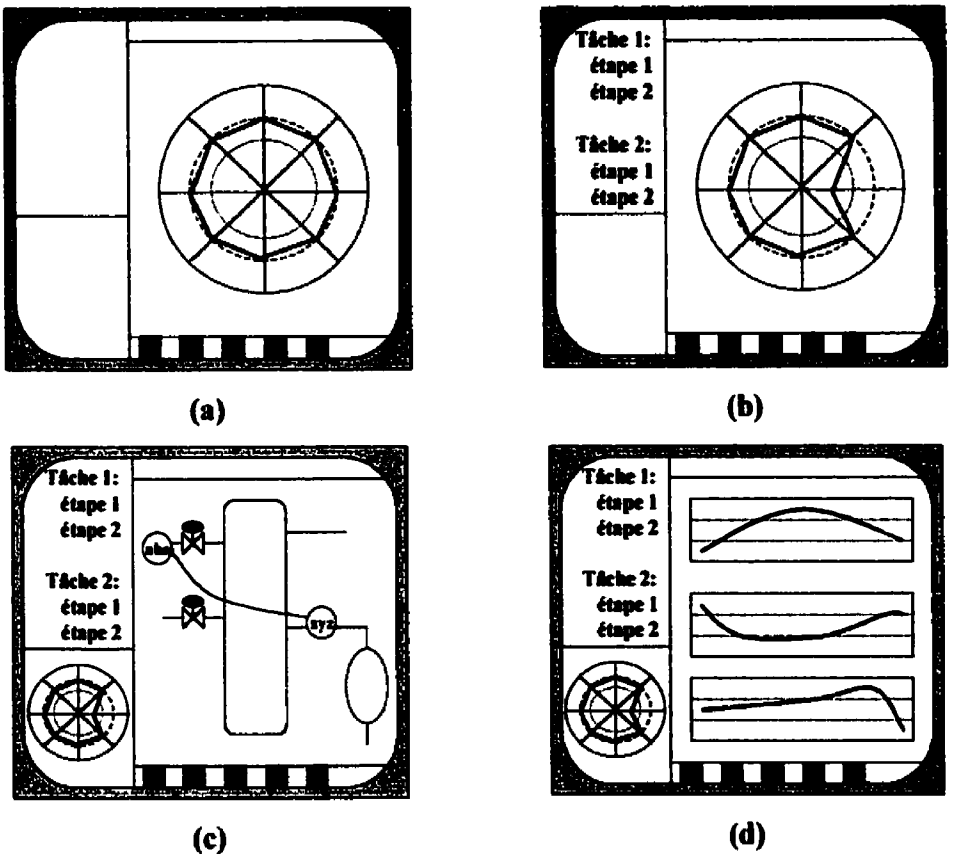


Figure 2-10: Éléments de l'imagerie de Predex.

La figure montre:

- Une image de surveillance, en (a), permettant de surveiller un ensemble de variables à l'aide d'un dispositif de type « objet ».
- Une image de détection d'anomalie et de soutien à la planification, en (b); dans ce cas, Predex fournit des informations superficielles identifiant la présence d'une anomalie et présente un plan pour gérer l'anomalie.
- Une image de soutien à la compréhension du plan de gestion de l'anomalie, en (c).

Dans ce cas, Predex peut afficher une image dite « de fluence » contenant des informations intermédiaires et montrant les liens entre les variables du processus impliquées avec le plan de gestion de l'anomalie.

- Une image de soutien à la compréhension de la propagation de l'anomalie, en (d). Predex peut fournir des informations « fondamentales » montrant les évolutions que subira le processus selon un modèle quantitatif intégré dans le système.

On note que dans tous les cas (a, b, c et d), Predex permet à l'opérateur de maintenir la surveillance de l'ensemble des variables soit à partir de l'image de surveillance ou en utilisant une forme réduite de celle-ci.

2.5.4 Discussion

Une des caractéristiques les plus intéressantes de Predex est l'attention apportée par les concepteurs à l'élaboration d'une interface tentant de soutenir le travail des opérateurs, ainsi que la dichotomie faite entre les situations normales et anormales. L'IHM du système Predex intègre aussi plusieurs types d'informations qui semblent pertinents pour la conduite en situations incidentelles comme les images (ou portions d'images) destinées à la surveillance du processus, à la présentation d'un plan de gestion d'anomalies et à l'explication des relations entre le plan et le processus. On peut toutefois formuler les critiques suivantes:

- Comme on l'a mentionné, Predex est un logiciel de génération de systèmes experts; le but visé initialement était de fournir un support automatisé au diagnostic et à l'identification des actions à prendre. Donc, le système ne constitue pas une méthode et ne fournit pas de démarche ou de critères, du moins explicites, pour concevoir des interfaces. Il pourrait être possible d'obtenir certaines des règles de conception d'interfaces à partir d'une inspection d'images existantes; cependant, le résultat ne saurait être qu'incomplet et basé sur des suppositions. En effet:

- Les publications disponibles ne fournissent pas toutes les images ni tous les détails des images fournies.
- Certaines règles de conception ne peuvent pas être extraites à partir d'un simple examen des images (p. ex., des règles éventuelles portant sur la priorisation de certaines images par rapport à d'autres, ou sur leur enchaînement).
- L'examen d'images ne permet pas de déterminer les intentions du concepteur de ces images. Par exemple, est-ce qu'un tableau de nombre est destiné par le concepteur à soutenir une tâche de démarrage pour un élément du processus, ou encore à en analyser l'efficacité? Est-ce que l'exploitation de cette image doit être effectuée de pair avec une ou plusieurs autres images?

- Même si a priori plusieurs des images du système Predex semblent utiles pour soutenir le travail des opérateurs, il n'y a pas eu, à notre connaissance, de validation expérimentale de la performance d'un processus piloté à l'aide de Predex versus celle d'un système piloté par une interface traditionnelle. Ainsi, même si l'allocation des types d'informations pour les tâches à effectuer à des images spécialisées semble intéressante, il n'y a pas de résultats empiriques permettant de tirer de conclusions solides à ce sujet.

- Enfin, le système Predex est limité à la gestion de situations anormales; aucun soutien n'y est prévu pour le soutien des situations normales. On peut ici arguer que s'il est possible de soutenir la gestion du premier type de situations, il doit être relativement facile de soutenir la gestion des autres. Il faut toutefois considérer que le soutien aux situations anormales est habituellement fourni de façon ponctuelle, en ayant recours à des informations et à des commandes aussi spécifiques que possible, alors que la conduite en situations normales fait appel à un grand nombre d'informations (ne serait-ce que pour la surveillance de l'ensemble du processus). Même si on reconnaît que des éléments de l'IHM du système Predex peuvent être très utiles pour les

situations anormales, on doit vraisemblablement les compléter pour soutenir au mieux les tâches de conduite lors de situations normales.

2.6 *Le système Formentor*

2.6.1 Description

Formentor est un projet à l'intérieur duquel on a élaboré à la fois des outils et une méthode de développement de systèmes d'aide à la décision visant à améliorer la sécurité des opérations dans les processus complexes (Pennings et Saussais, 1993). Ce projet a été élaboré dans le cadre d'Eureka, un réseau pan-européen impliqué dans la recherche et le développement de nouvelles technologies. Comme le financement des projets est en partie assuré par les partenaires qui y sont impliqués, seule une partie des résultats des travaux de recherche ont été publiés dans les publications techniques et scientifiques du domaine public; en conséquence, certaines informations relatives à Formentor et qui pourraient être pertinentes pour cette recherche ne sont pas disponibles.

L'exploitation de Formentor intervient lorsque la situation s'est dégradée de façon telle que le processus a quitté ses régions normales de fonctionnement (Wilikens et Burton, 1996). Les concepteurs de Formentor reconnaissent qu'un système de ce genre doit avoir recours à plusieurs types de modèles du processus pour soutenir efficacement la tâche d'un opérateur (Nordvik, Mitchison et Wilikens, 1994). On peut classer ces modèles comme suit:

- Un modèle fonctionnel identifie les buts, les fonctions, les critères de réussite des buts et des fonctions ainsi que les systèmes requis pour leur mise en œuvre. Ce modèle fonctionnel correspond à une description hiérarchique des buts associés à la conduite d'un système et aux moyens (ou chemins) permettant d'atteindre ces buts. À l'origine, ce modèle avait été proposé pour tenter d'améliorer la problématique des

alarmes (Modarres et Cadman, 1986; voir la section 3.3.1 pour une description). Dans Formentor, le rôle de ce modèle est de fournir les informations requises pour soutenir la tâche de surveillance.

- Un modèle structurel décrit les éléments physiques constituant le processus.
- Un modèle comportemental décrit comment les éléments physiques se comportent sous des conditions normales ou anormales et sert à prédire leur comportement.
- Un ensemble d'heuristiques incorpore des solutions connues à des problèmes usuels.

Selon les auteurs, la mise en œuvre de ces modèles et leur synchronisation avec l'état réel du processus requièrent beaucoup d'informations qui doivent provenir de mesures effectuées sur ce dernier. Il est fréquent que certaines des informations soient manquantes, en particulier pour le modèle comportemental.

2.6.2 Mise en oeuvre

Il existe une méthodologie de conception pour la mise en oeuvre du système Formentor (Pennings, Ponamale et Gerlinger, 1996). Cette méthodologie propose des encadrements pour les différents aspects du développement d'un tel système (gestion, ensemble de techniques et d'outils pour l'élaboration de modèles et la réutilisation d'informations, un recueil d'expériences vécues lors des projets pilotes).

Cette méthodologie incorpore aussi des considérations ergonomiques sur la conception de l'IHM. Toutefois, peu d'informations sont disponibles sur la façon dont ces considérations sont prises en compte; la seule description que nous en connaissons (Pennings, Ponamale et Gerlinger, 1996) se limite à mentionner que l'ergonomie est cruciale pour l'adaptation du système aux besoins de l'opérateur et pour que ces derniers acceptent d'utiliser le système. Selon ces auteurs, la méthodologie prend en compte les besoins des opérateurs, leurs activités, leurs caractéristiques et leur environnement; le tout se déroule à l'intérieur d'un cycle de conception itératif d'IHM.

2.6.3 Interfaces résultantes et résultats

La figure suivante montre une des images utilisées dans l'interface de Formentor.

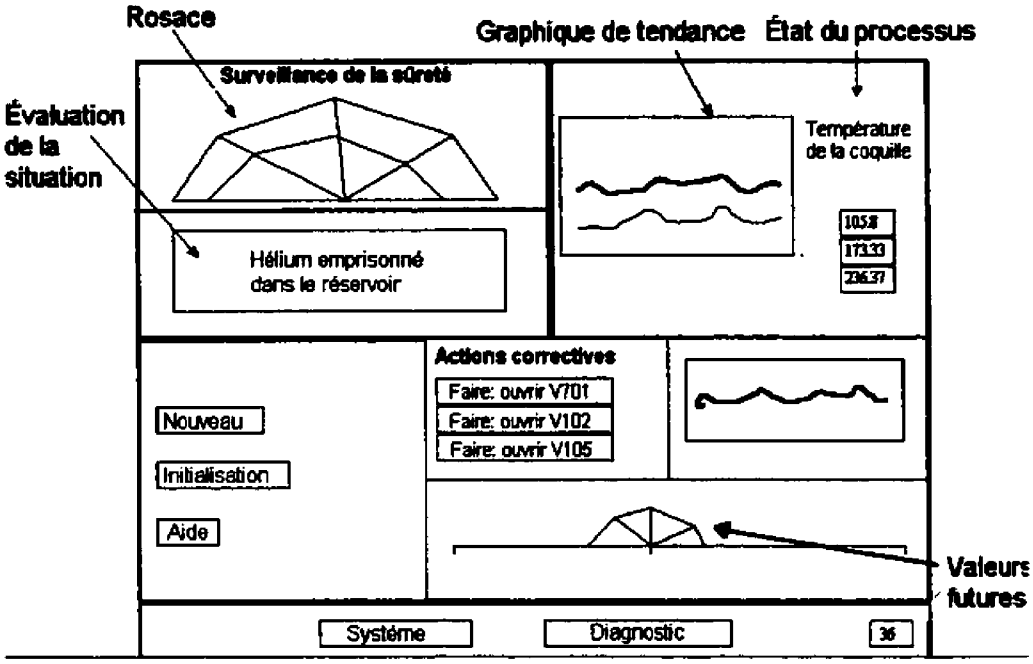


Figure 2-11: Exemple d'image utilisée dans Formentor.

L'image contient les éléments suivants:

- Une rosace utilise des techniques de codage de couleur et de forme pour soutenir la détection de menace(s) aux buts de niveau supérieur définis dans le modèle fonctionnel.
- Une zone d'évaluation identifie l'anomalie qui a été détectée.
- Des graphiques de tendances soutiennent la surveillance de l'évolution de la situation.
- Une zone permet d'afficher les étapes d'un plan de gestion de l'anomalie.
- Une zone montre la prédiction de l'évolution de l'anomalie, telle que prédite par le système Formentor, si aucune contre-mesure n'est appliquée.

Des validations de Formentor ont été effectuées dans les domaines suivants: la pétrochimie, l'aérospatiale et le nucléaire. Ces validations portaient sur la capacité de Formentor à identifier des anomalies et à proposer des plans pour leur gestion. Toutefois, il n'y a pas de résultats disponibles portant sur l'adéquation de l'IHM pour les tâches prévues.

2.6.4 Discussion

Formentor présente plusieurs idées intéressantes. En particulier, on note que (qu'):

- Il s'agit d'une application grandeur nature et portant sur différents types de processus du modèle fonctionnel de type arbre des buts et des chemins. De plus, Formentor a permis de développer des améliorations à ce formalisme pour tenir compte de phénomènes tels que l'inertie des systèmes physiques.
- Le modèle fonctionnel permet d'intégrer de façon explicite des contre-mesures permettant de gérer des menaces à des buts spécifiques.
- Lors d'essais en situations réelles ou simulées, Formentor a fonctionné de façon satisfaisante sauf lors de problèmes faisant intervenir des perturbations pour lesquelles des mesures n'étaient pas disponibles (p. ex., capteur manquant) (Nordvik et al., 1994).

Par ailleurs, et comme dans le cas du système Predex (voir la section 2.5.4), ce système d'aide à la gestion d'anomalies n'offre pas de soutien pour la gestion de situations normales. Enfin, les mêmes réserves existent que pour le système précédent quant à l'extraction de règles et de principes de conception d'IHM à partir de l'inspection d'images existantes.

2.7 *La proposition méthodologique de Neboit, Guillermain, Fadier*

2.7.1 Description

Ces auteurs proposent une démarche combinant l'analyse du processus, de ses dysfonctionnements et de la tâche des opérateurs. Le but visé est l'amélioration de la performance du processus en intégrant à l'interface les informations permettant de mieux en gérer les dysfonctionnements (Neboit, Guillermain et Fadier, 1990). On ne dispose pas d'exemple d'interfaces pour cette méthode.

2.7.2 Mise en oeuvre

La démarche comporte les étapes suivantes:

- Analyse systémique préliminaire: effectuée au moyen de schémas-blocs et de graphes de fluence pour comprendre les aspects structuraux et fonctionnels du processus.
- Analyse systémique des dysfonctionnements: pour identifier des sous-systèmes sensibles pour lesquels on analyse les dysfonctionnements possibles au moyen d'outils comme l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets. On identifie alors les dysfonctionnements critiques qui permettent d'élaborer l'arbre de défaillance systémique.
- Analyse ergonomique des dysfonctionnements: on raffine les niveaux inférieurs de l'arbre de défaillance systémique au moyen d'une analyse ergonomique des dysfonctionnements critiques de type « opérateur - processus - contexte de travail ».
- Analyse cognitive des dysfonctionnements: on analyse, à partir des arbres précédents, des dysfonctionnements critiques de type « opérateur - processus - contexte de travail ». Les résultats sont reportés sur l'arbre de défaillance précédent.
- Propositions et recommandations: on identifie des opportunités d'améliorations à l'arbre de défaillance et on propose des activités de re-conception (ou de conception)

pour implanter les améliorations.

2.7.3 Discussion

Cette proposition méthodologique comporte plusieurs points remarquables, soit:

- L'utilisation de façon complémentaire de plusieurs modèles (structurel, fonctionnel, causal).
- L'identification d'événements redoutés crédibles pour lesquels on peut soit procéder à des améliorations en vue de les éliminer, soit élaborer à l'avance des plans de contingence et intégrer dans l'interface les éléments nécessaires pour effectuer efficacement la récupération de ces événements. D'autres auteurs ont abouti à des conclusions similaires dans le cadre d'une étude sur la conception d'une interface pour la surveillance du système de contrôle environnemental prévu pour une station spatiale (Potter, Woods, Hill, Boyer et Morris, 1992).
- Cette proposition méthodologique se situe à un niveau assez élevé; elle énumère diverses méthodes pour parvenir à formuler des améliorations à des interfaces, mais elle ne propose pas de démarche détaillée pour concevoir celles-ci.

Enfin, et en dépit des aspects intéressants de la proposition, il n'y a pas eu, à notre connaissance, de validation expérimentale permettant de comparer l'amélioration de la performance liée aux éléments d'interface résultants.

2.8 Les résultats de Siebert, Sicard, et Thebault

Ces auteurs présentent les résultats d'études portant sur l'évaluation expérimentale d'interfaces pour divers types d'incidents (Siebert, Sicard et Thebault, 1988; Siebert et al., 1989). L'évaluation expérimentale a eu lieu en deux étapes:

- Lors de la première étape, on a testé trois types d'interfaces pour la détection et la gestion d'incidents simulés lors de la conduite d'une partie d'une centrale nucléaire.

Les interfaces comprenaient:

- Une imagerie traditionnelle de type « schéma mécanique ».
- Une imagerie basée sur une représentation fonctionnelle du processus et montrant des informations, numériques ou graphiques, permettant de juger de la performance adéquate des fonctions du processus. L'opérateur pouvait aussi, au moyen d'un système de fenêtrage approprié, explorer les sous-fonctions, sous-sous-fonctions, etc., associées à une fonction donnée, et ce, jusqu'au niveau matériel.
- Un pupitre câblé similaire à celui se trouvant dans les salles de commande traditionnelles.

Au total, douze simulations ont eu lieu pour chaque interface, correspondant à quatre incidents qui étaient répétés chacun trois fois.

- Les leçons tirées de la première étape ont été utilisées à l'étape suivante pour élaborer une nouvelle imagerie qui a aussi été soumise à des essais et comparée à un pupitre câblé. La nouvelle imagerie a utilisé des éléments familiers (graphiques à barres, indicateurs numériques, etc.) comme formalisme de représentation de l'information fonctionnelle. À cette étape, on a utilisé le même protocole d'expérimentation qu'à l'étape précédente.

Les résultats suivants ont été obtenus:

- La surveillance du processus et la détection d'anomalies sont favorisées par le regroupement sur une seule image de toutes les informations associées à l'accomplissement d'une fonction. Toutefois, à partir de cette image, les opérateurs souhaitent pouvoir disposer rapidement d'un lien vers une représentation « matérielle » correspondant à un schéma mécanique du même type que celui montré à la Figure 2-1.
- Des images présentant une hiérarchie d'informations et mettant en évidence les

relations dynamiques entre les variables favorisent l'interprétation des informations et la formulation d'hypothèses par les opérateurs.

- Il est très important de disposer de graphiques de tendances pour évaluer l'évolution de certains paramètres, leur corrélation, etc.

Toutefois, on note que l'étude ne fournit pas de méthode systématique de conception d'IHM permettant, à partir d'une situation donnée, d'élaborer une interface.

2.9 Autres résultats

Divers autres résultats pertinents sont disponibles. Parmi ceux-ci, on a retenu une synthèse de retours d'expérience de concepteurs professionnels d'IHM dans des centrales électriques à combustible fossile (Gaddy, Taylor, Beare, Humphrey, Christiansen et Blanco, 1993). Les auteurs présentent plusieurs recommandations, dont certaines sont directement liées à l'identification du type d'informations qu'une imagerie devrait fournir à des opérateurs. En particulier, ils proposent de distinguer, mais sans en donner d'exemples, les images destinées à:

- des tâches spécifiques (p. ex., pour aider à l'alignement de vannes),
- la surveillance ciblée (p. ex., pour des vues de supervision sélectives),
- la surveillance générale (p. ex., permettant de juger du bon état général du système),
- la gestion d'anomalies,
- la surveillance des paramètres de sûreté.

Une autre auteure (Bainbridge, 1991) propose, sur la base de considérations cognitives, de distinguer les images orientées vers les méthodes (ou, de façon équivalente, vers les tâches), et les images qui sont indépendantes des méthodes. Bien qu'elle ne fournisse pas d'exemples de celles-ci, l'auteure distingue les images contenant l'information sur

les divers moyens d'atteindre des buts d'opération, et celles donnant de l'information générale sur le processus indépendamment de buts particuliers.

L'auteure recommande d'utiliser des images orientées vers les méthodes lorsque certaines opérations spécifiques doivent être effectuées dans un ordre particulier (p. ex., démarrage, arrêt); elle n'en définit toutefois pas le contenu. Par ailleurs, dans l'éventualité où un but d'opération n'est plus atteint, elle recommande d'utiliser une image donnant de l'information sur les différents moyens disponibles pour rétablir l'atteinte de ce but.

L'auteure émet cependant une mise en garde sur la sur-utilisation des images orientées vers des méthodes; en effet, cela pourrait empêcher les opérateurs de maintenir une bonne connaissance des autres images qui sont susceptibles d'être requises en cas de situation imprévue. Elle suggère aussi de tenter d'utiliser des images plus génériques pour minimiser cette lacune potentielle des images orientées exclusivement vers des méthodes spécifiques.

Ces idées furent mises à l'essai lors d'une étude récente exécutée à l'occasion de l'implantation d'un nouveau système informatisé de conduite dans une usine chimique (Kontogiannis et Embrey, 1997). Lors de cette étude, des images furent construites pour améliorer la surveillance et la commande du processus; la figure suivante montre un exemple d'image orientée vers les méthodes.

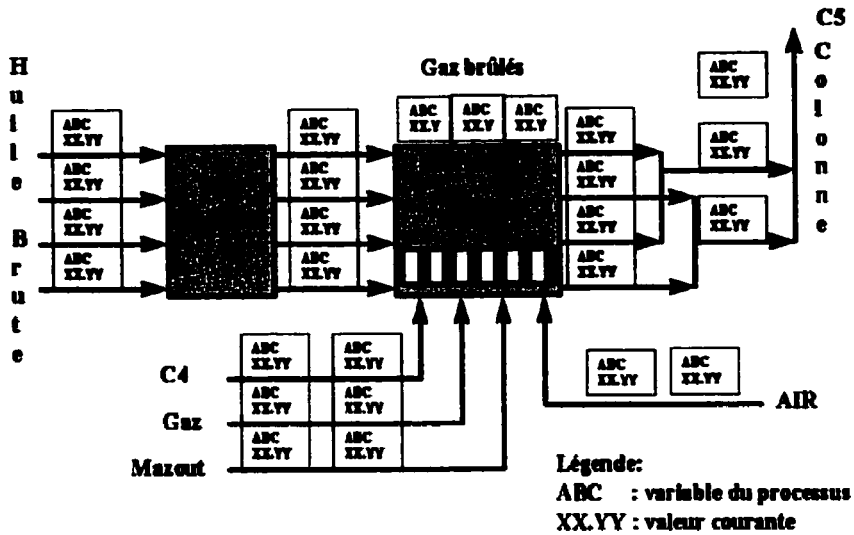


Figure 2-12: Exemple d'image orientée vers les méthodes.

Cette image, qui correspond à un schéma mécanique simplifié du processus, fournit les données nécessaires pour traiter des tâches prévues (p. ex., démarrage du processus, changement du type d'alimentation, surveillance de l'atteinte des objectifs de la tâche). Une hypothèse importante des auteurs de cette étude est que les opérateurs savent utiliser les données fournies pour exécuter ces tâches. L'étude fournit aussi un exemple d'image qui sert à soutenir la surveillance de l'atteinte des buts; cette image est indépendante d'une méthode ou d'une tâche spécifique. La figure suivante montre cette image.

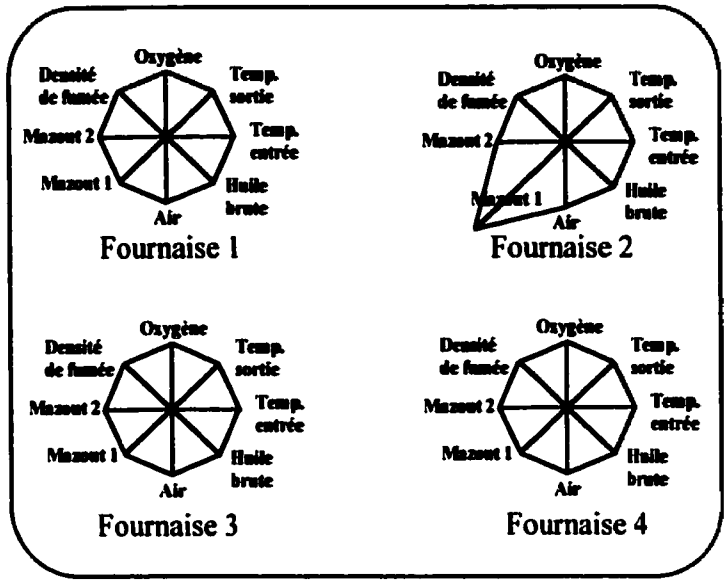


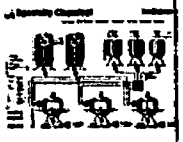
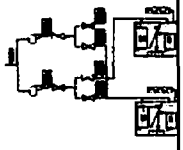
Figure 2-13: Exemple d'image indépendante des méthodes.

Ici, les auteurs ont choisi d'afficher les données relatives aux buts d'opération de fournaises au moyen de dispositifs similaires à ceux utilisés dans Predex (voir Figure 2-10, a et b).

2.10 Synthèse - méthodes de conception d'IHM

On constate qu'il existe des différences importantes dans la façon de traiter le problème de la conception d'IHM pour la conduite de systèmes complexes. Le tableau suivant synthétise les aspects les plus importants des méthodes de conception examinées; une synthèse des résultats des autres sources d'informations sera présentée plus loin dans cette section.

Tableau 2-1: Synthèse des méthodes de conception.

Méthode et exemple d'IHM	Contenu de l'IHM et résultats expérimentaux en appui		Méthode, principes ou règles de conception et niveau de détail
	Situations normales (surveillance et commande)	Situations anormales (surveillance et commande)	
Traditionnelle 	• Contenu: représentation de certains éléments physiques du processus et de variables associées, complétée de tableaux de nombres, de graphiques, de listes d'alarmes, etc.	• Contenu: idem, sauf exceptions (fiches d'alarmes et procédures de conduite) dans certains domaines à risque.	• Non; mais des règles et des principes ergonomiques peuvent être utilisés pour des aspects limités de la conception d'IHM.
EID 	• Contenu: relations entre des variables du processus, représentation des buts, sous-buts, etc. du processus. Représentation mécanique de certains éléments physiques du processus. • Résultats: l'exploitation de l'IHM EID a eu peu ou pas d'effets sur la performance des opérateurs sauf dans certains cas où la variance du temps requis pour effectuer certaines manoeuvres a été plus faible, bien que pour certaines de celles-ci, les opérateurs exploitant l'IHM EID ont été plus lents.	• Contenu: idem. • Résultats: une IHM EID semble supérieure à une IHM traditionnelle pour détecter des pannes, en particulier pour les sujets ayant des connaissances théoriques plus élaborées; cependant, ne semble pas supérieure pour compenser les pannes. • Semble manquer de l'information historique sur l'évolution des variables dans une interface EID.	• 3 principes généraux et peu explicites; insuffisants pour guider un concepteur.
IMAC 	• Contenu: informations requises pour la surveillance, intégration des informations (surveillance, commande, procédure) pour effectuer des manoeuvres, dispositifs pour faciliter la consultation des informations. • Résultats: des résultats limités suggèrent que des opérateurs exploitant une IHM IMAC exécutent des manoeuvres plus rapidement et avec moins d'erreurs que ceux exploitant l'IHM originale.	• Contenu pour les situations prévues: idem. • Aucun contenu pour les situations imprévues. • Résultats: des résultats limités suggèrent que des opérateurs exploitant une IHM IMAC détectent plus de pannes, et plus rapidement, que ceux utilisant l'IHM originale.	• 4 étapes générales et des principes plus détaillés mais peu explicites. • Le concepteur doit décider quel principe est approprié pour une image ainsi que déterminer comment le mettre en oeuvre.

Par ailleurs, le tableau suivant synthétise les informations recueillies pour les systèmes d'aide à la détection et à la gestion d'anomalies.

Tableau 2-2: Synthèse pour les systèmes d'aide à la détection et à la gestion d'anomalies.

Méthode et exemple d'IHM	**Contenu de l'IHM et résultats expérimentaux en appui**	**Méthode, principes ou règles de conception et niveau de détail**
Woods et Roth	• Contenu: représentation des buts (ou fonctions) du processus, des liens entre ceux-ci, et projection des variables montrant l'évolution des buts. En cas de détection d'une menace (actuelle ou projetée) à un des buts, identification de celle-ci et proposition d'une contre-mesure procédurale. • Résultats: Aucun.	Non.
Predex	• Contenu: découpage du contenu des images selon les tâches qu'elles permettent d'exécuter; dispositifs (graphique objet et graphique de tendances) pour la surveillance de variables. En cas de détection d'anomalie, identification de celle-ci, proposition d'une contre-mesure procédurale et explications sur l'action de la contre-mesure. • Résultats: Aucun.	Non.
Formentor	• Contenu: information pour surveiller l'atteinte des buts du processus (selon une décomposition fonctionnelle). En cas de détection d'anomalie, identification de celle-ci, de ses causes potentielles, de tests pouvant être effectués pour confirmer le diagnostic, proposition d'une contre-mesure, prévision d'évolution de la situation sans l'application d'une contre-mesure. • Résultats: Résultats sur l'ensemble du système, mais pas sur l'exploitation de l'IHM.	Une méthode existe, mais il n'y a pas suffisamment d'informations disponibles sur sa portée ni sur les étapes de sa mise en oeuvre.

Ces tableaux, ainsi que les sections précédentes, montrent que des carences importantes existent, selon les méthodes, les cas ou les systèmes examinés, quant au type d'informations et de soutien offerts à l'opérateur. En effet, alors qu'EID vise à soutenir le mieux possible les cas imprévus (surtout pour la détection d'anomalies et leur diagnostic), elle requiert que l'opérateur élabore ses propres plans d'actions pour tous les cas alors que des plans appropriés, et probablement plus optimaux, pourraient lui être fournis, du moins pour les situations prévues. Ce dernier type de soutien semble d'autant plus approprié que les évaluations d'EID ont été décevantes par rapport à l'amélioration de la performance des opérateurs lors de manoeuvres telles que des démarrages, des changements de niveaux de production, etc. Le succès d'IMAC pour le soutien de tâches prévues au moyen d'images taillées « sur mesure » pour traiter ces cas appuie aussi ce point de vue; malheureusement, IMAC néglige les situations imprévues.

Par ailleurs, les IHM utilisées dans les systèmes de soutien à la détection et au soutien à la gestion d'anomalies (ceux de Woods et Roth, Predex et Formentor) comportent certaines caractéristiques communes: surveillance des buts et sous-buts d'opération, fourniture de contre-mesures sous forme procédurale pour la gestion des anomalies, explication de l'action des contre-mesures et prévision de l'évolution du processus. Les informations disponibles pour deux de ces systèmes (celui élaboré par Woods et Roth et Formentor) indiquent qu'une représentation fonctionnelle du processus peut servir de base à la détection et au diagnostic des anomalies.

Les résultats indiquent aussi que l'imagerie devrait comporter des images orientées vers la surveillance et d'autres orientées vers la commande (sections 2.5, 2.8 et 2.9); il est cependant recommandé de minimiser le nombre de ces dernières pour développer et maintenir l'habileté de l'opérateur à exploiter les autres images qu'il aura à utiliser pour les situations imprévues (section 2.9).

À partir des sections et des tableaux précédents, on tire les enseignements suivants pour l'élaboration d'une méthode améliorée:

- On devrait fournir des images adaptées aux tâches de commande prévues, basées sur l'identification préalable des besoins en informations et en commandes pour ces tâches.
- Bien que l'on ne dispose pas de résultats empiriques pour appuyer ce choix, l'analyse des informations précédentes indique qu'on devrait soutenir la gestion des anomalies prévisibles en fournissant des informations sur la stratégie à suivre, et que cette stratégie peut être exprimée sous forme procédurale. De plus, on devrait fournir une projection de l'évolution de la situation quand une anomalie survient.
- On devrait élaborer des images de surveillance à partir d'un modèle du processus de type fonctionnel mettant en évidence les buts d'opération poursuivis et les informations et critères permettant d'en déterminer l'atteinte.

Par ailleurs, et au-delà de la nature des informations que les méthodes (traditionnelle, EID, IMAC ou, éventuellement une autre méthode) fournissent aux opérateurs, la mise en oeuvre même de ces méthodes est problématique. En effet, plusieurs des principes proposés par les méthodes examinées jusqu'ici sont vagues et exigent une interprétation considérable de la part du concepteur, ce qui, comme on en a discuté à la section 1.3, est inadéquat pour soutenir le travail de ce dernier. Même si on complétait ces principes par des recommandations et des règles ergonomiques très détaillées, le nombre et la complexité de ces éléments exigeraient du concepteur qu'il choisisse ceux qu'il doit utiliser et qu'il détermine comment les mettre en oeuvre. Des chercheurs ont déjà examiné cette question et concluent que l'exploitation par les concepteurs des recommandations ergonomiques actuellement disponibles est insatisfaisante (Burns, Vicente, Christoffersen et Pawlak, 1997). Une de leurs principales recommandations est que ce type d'informations devrait être fourni au concepteur de façon « taillée sur mesure », préférablement pour un type d'industrie ou une même classe de problèmes de

conception. Par ailleurs, il est clairement irréaliste de vouloir décrire l'ensemble des images qui conviendra aux diverses situations qui sont susceptibles de se présenter, ne serait-ce qu'à cause du nombre potentiellement élevé, de la diversité et de la complexité de celles-ci.

Une autre avenue, qui est celle privilégiée dans cette thèse, consiste à identifier et à définir les types d'informations (y compris leur organisation) que l'IHM doit fournir pour la conduite de processus en situations prévues et imprévues, et ce, de façon générique. On peut aussi identifier des recommandations et règles ergonomiques, au moins de haut niveau, pour encadrer l'exploitation de chaque type d'informations. On dispose alors d'une architecture d'IHM que le concepteur peut instancier pour un cas donné. L'utilisation d'une telle architecture permet au concepteur de tirer avantage des connaissances qui y auront été « pré-compilées »; de plus, cette architecture, une fois validée, peut servir de référence pour l'évaluation d'IHM existantes.

Pour atteindre les objectifs qui ont été identifiés précédemment (voir section 1.3) et tenir compte des enseignements tirés de la revue effectuée dans ce chapitre, on ne pourra pas s'en tenir à une simple synthèse des méthodes vues ici. D'une part, la philosophie sous-jacente à chacune de ces méthodes rend leur intégration problématique; d'autre part, les lacunes qui leur ont été identifiées indiquent qu'il faut examiner plus en détails la problématique de base. Enfin, la portée de la méthode qui sera proposée dépasse celle des méthodes qui ont été examinées.

À la base, l'identification et la définition de ces types d'informations doivent tenir compte, de façon simultanée, des caractéristiques de l'opérateur, des exigences de conduite du processus et de la tâche de l'opérateur. Au prochain chapitre, on montre comment on peut y parvenir.

CHAPITRE 3: L'OPÉRATEUR, SA TÂCHE ET LE PROCESSUS

Dans ce chapitre, on définit les types d'informations, y compris leur organisation, utilisés par un opérateur lors de la conduite d'un processus. À la base, l'IHM sert d'intermédiaire entre l'opérateur, sa tâche et le processus; la figure suivante décrit cette relation.

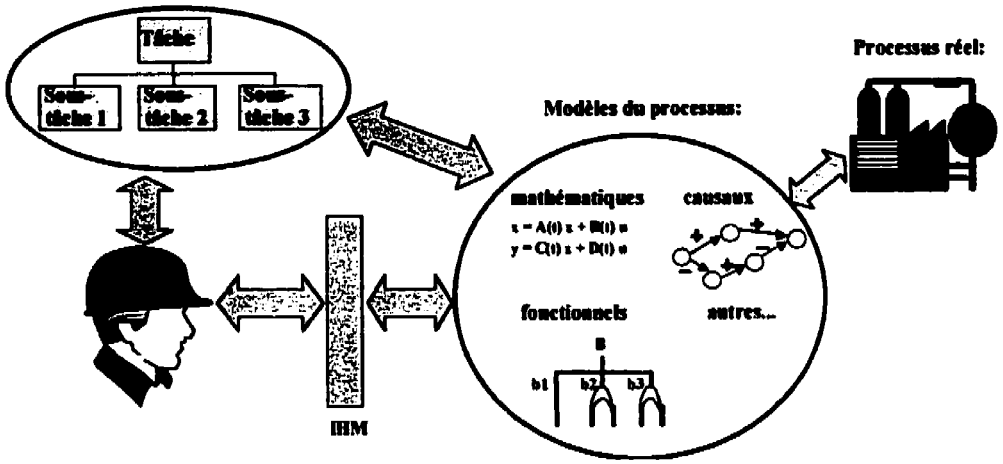


Figure 3-1: Liens entre l'opérateur et les sources d'information.

La figure montre les flux d'informations entre l'opérateur (et implicitement sa tâche), l'IHM et le processus, dans la perspective restreinte de l'utilisation d'une IHM informatisée. D'abord, le choix et l'exécution des tâches sont influencés par les caractéristiques de la prise de décision chez l'opérateur. De plus, lors de l'exécution de sa tâche, celui-ci aura recours aux informations transitant par l'interface. Les informations proviennent de diverses vues (ou modèles) du processus; par exemple, l'identification et la localisation des équipements peuvent être obtenues à partir d'un modèle physique du processus, alors que l'information sur l'atteinte des buts d'opération pourrait provenir d'un modèle fonctionnel de ce dernier. On peut donc envisager l'existence d'un pairage naturel entre des types de tâches de conduite et les informations provenant de divers modèles du processus. Comme on le montre plus loin

dans ce chapitre, un tel pairage peut être exploité pour former la base d'une méthode améliorée de conception d'IHM.

Cette interdépendance entre des types de tâches et des vues du processus n'est pas surprenante a priori; une tâche de conduite doit, éventuellement, résulter en une action sur un élément du processus alors que ce dernier doit être opéré pour que l'ensemble humain-machine puisse accomplir la mission qui lui a été impartie.

Pour définir les types d'informations à fournir sur une IHM et la façon d'organiser cette information, on examine d'abord des modèles de performance de l'opérateur permettant de mieux comprendre comment celui-ci exécute ses tâches. Ensuite, on définit un ensemble de tâches que l'opérateur exécute lors de la conduite de processus. Ces tâches servent alors de cadre intégrateur pour tenir compte simultanément des besoins en informations de l'opérateur et identifier les modèles de processus susceptibles de fournir et de présenter ce type d'informations dans une IHM.

3.1 Modèles de performance de l'opérateur

La compréhension de la prise de décision chez l'opérateur a beaucoup évolué suite aux travaux sur la modélisation de la performance des opérateurs humains qui ont été exécutés au cours des dernières années (voir par exemple la synthèse de Baron, Kruser et Huey, 1990). Dans le cadre de cette recherche, on a examiné divers modèles qui semblent particulièrement pertinents:

- Le modèle de Rasmussen, qu'on a décrit à la section 2.2, est le plus connu et jouit d'une très large acceptation sociale. Ce modèle conceptuel distingue plusieurs niveaux de comportements (habiletés, règles et connaissances fondamentales). Toutefois, à notre connaissance, il n'a pas été validé expérimentalement.
- Le modèle COSIMO a été développé pour effectuer des études de sûreté dans des

systèmes humains-machines complexes et est montré à la figure suivante (traduite et adaptée de Cacciabue, Mancini et Bersini, 1990).

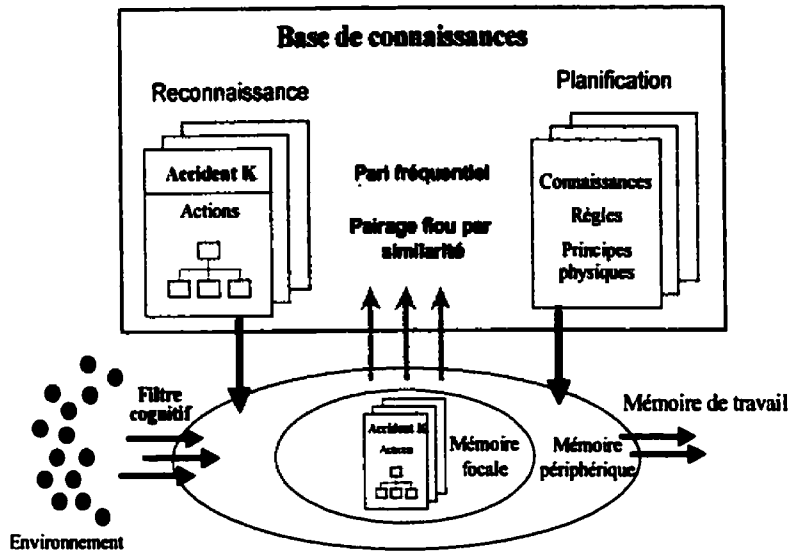


Figure 3-2: Modèle COSIMO.

On y retrouve:

- L'obtention de données provenant de l'environnement et qui sont acheminées à un filtre cognitif tenant compte des caractéristiques de surface des informations (p. ex., taille, brillance); ces données sont ensuite amenées en mémoire de travail.

- L'utilisation de ces données filtrées pour identifier un plan d'action approprié à la situation en cours. Cette identification se fait en deux étapes. D'abord, il y a un pairage flou par similarité entre les données et les conditions d'entrée de plans existants (à gauche dans la « base de connaissance » ou mémoire à long terme de l'opérateur). Si plus d'un plan est identifié comme candidat potentiel, un mécanisme de « pari fréquentiel » est alors utilisé par lequel on suppose que le plan le plus fréquemment utilisé est approprié.

- L'élaboration d'un plan (à droite dans la « base de connaissance »), si aucun plan existant ne semble approprié. Cette étape fait intervenir des connaissances de l'opérateur sur des principes physiques fondamentaux.

- Le modèle de Rouse a été développé sur la base d'une vaste revue de la littérature technique et scientifique. Ce modèle apparaît à la figure suivante (traduite et adaptée de Rouse, 1983).

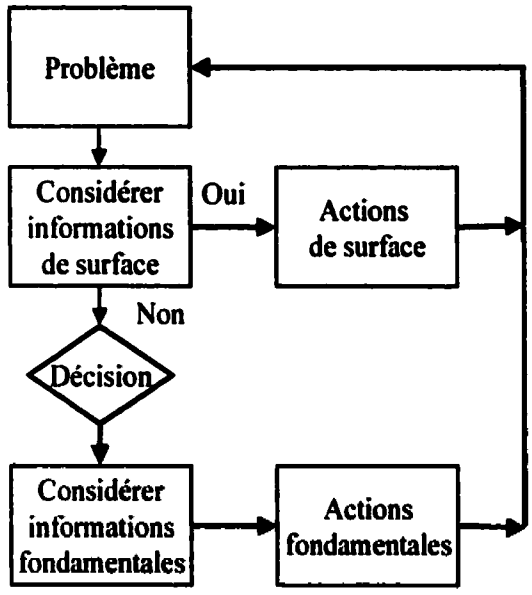


Figure 3-3: Modèle de Rouse.

Ce modèle tient compte de la prise de décision et de l'implantation de plans en situation connue (à partir de l'information « de surface ») ou nouvelle (à partir de l'information « fondamentale »). Ce modèle est appliqué à chacune des étapes de la prise de décision chez un opérateur (selon Rouse), soit la classification de la situation, la planification et la mise en oeuvre du plan. La combinaison du modèle et des étapes de la prise de décision permet de distinguer:

- la classification de la situation comme étant connue ou nouvelle,
- l'existence d'un plan approprié ou la nécessité d'en élaborer un,

- la connaissance des étapes de mise en oeuvre du plan ou la nécessité de déterminer comment le mettre en oeuvre.

De plus, le modèle de Rouse a été développé en considérant un ensemble de tâches principales exécutées par les opérateurs.

- Plus récemment, le modèle RPD[14] a été proposé à la suite d'études sur le terrain réalisées auprès de personnes intervenant lors d'incendies et d'opérations de recherche et sauvetage (Klein et Calderwood, 1991)). Le modèle a aussi été utilisé lors de l'étude de la prise de décision dans des domaines à risques élevés (p. ex., militaire, plate-formes de forage, police) (Flin, Slaven et Stewart, 1996). Trois versions du modèle RPD peuvent être utilisées (Hutton et Klein, 1999):

  - Dans le cas le plus simple, la prise de décision est faite à partir d'un pairage simple entre les caractéristiques de la situation et celles d'un cas connu; un plan d'action correspondant et bien maîtrisé est alors choisi pour être mis en oeuvre.

  - Dans d'autres cas, l'identification de la situation ou le choix du plan ne sont pas immédiatement clairs; deux processus peuvent alors être utilisés pour clarifier les choses. Le premier consiste à tenter d'isoler des caractéristiques de la situation en cause et à essayer de les associer à un cas connu; le second consiste à tenter d'identifier un scénario ayant donné lieu à la situation présente en tenant compte du contexte et de la plausibilité du scénario. Ceci conduit normalement à la ré-évaluation de la situation et à son pairage avec un cas connu.

  - Enfin, il peut arriver que suite à l'identification du cas à traiter, le plan à mettre en oeuvre doive être évalué. Cette évaluation prend alors la forme d'une simulation mentale du plan par l'opérateur.

---

[14] On utilise l'acronyme original pour « Recognition-Primed Decision Making ».

Le modèle RPD comporte les caractéristiques suivantes (Hutton et Klein, 1999):

- L'utilisation de la reconnaissance de la situation pour la classer comme connue ou inconnue.
- On peut tirer avantage d'informations complémentaires qui sont disponibles dès qu'on peut associer une situation à un cas connu. Ces informations portent sur les buts plausibles à poursuivre, les indices à surveiller, les attentes légitimes de succès et les actions requises pour atteindre le but.
- Les plans (ou suites d'actions requises) sont produits de façon sérielle, et le premier plan produit est généralement très typique de la situation.

On constate plusieurs similitudes entre les modèles précédents, soit:

- La prise de décision est plus efficace et plus sûre quand elle s'appuie sur la reconnaissance de forme plutôt que sur l'analyse des informations obtenues.
- L'élaboration de plans d'action est faite, de façon privilégiée, par l'identification, la ré-utilisation et, le cas échéant, l'adaptation de plans ayant bien fonctionné dans le passé plutôt que par l'élaboration de nouveaux plans ou par le recours à « l'inspiration du moment ».
- Quand la reconnaissance de forme ou la ré-utilisation de plans existants ne semblent pas satisfaisantes, les opérateurs doivent recourir à leurs connaissances fondamentales pour élaborer un plan. Cette façon de procéder est toutefois beaucoup plus lourde et susceptible de produire des erreurs, surtout si la charge de travail ou le stress sont élevés.

Les éléments précédents indiquent que la méthode de conception d'IHM qui sera proposée devrait:

- Permettre de mettre en évidence les situations correspondantes à des cas connus.

- Soutenir l'identification, l'adaptation et la ré-utilisation de plans existants (normalement, sous forme procédurale). On note d'abord que cette approche diffère de celle qui a été retenue dans EID. On reconnaît aussi, comme d'autres auteurs (p. ex., voir Reason, 1986), les dangers liés à l'erreur éventuelle d'un opérateur dans l'identification d'un plan alors que la situation réelle diffère de celle qu'il a cru reconnaître. On peut toutefois identifier des solutions à ce problème; ces solutions seront présentées plus loin dans ce chapitre.

Il faut noter que certains auteurs considèrent les modèles de performance précédents comme étant réducteurs car trop linéaires, contraignants et monolithiques, en particulier dans une perspective où l'exécution d'une tâche ne prend tout son sens que dans un contexte donné (Amalberti et Hoc, 1998). Selon ces auteurs, il faut plutôt effectuer une analyse fine de la tâche et du comportement de l'opérateur dans une situation donnée pour comprendre les tenants et aboutissants de ses décisions. Cette approche semble intéressante dans une perspective d'analyse en vue d'améliorer l'état de la connaissance dans la modélisation de la performance humaine. Cependant, elle ne semble pas, dans l'état actuel des choses, réaliste pour élaborer une méthode de conception permettant de déterminer, a priori, les types d'informations à fournir à des opérateurs; ceci est particulièrement vrai en regard de l'objectif de simplicité mentionné à la section 1.3.

Par ailleurs, des travaux récents portant sur la « conscience de la situation[15] » (Endsley, 1995) ouvrent la porte à l'amélioration des modèles dans le domaine de la prise de décision chez les opérateurs. On définit cette conscience de la situation comme étant constituée par la perception des éléments à l'intérieur d'un volume spatio-temporel donné, la compréhension de leur signification et la projection de leur état dans le futur proche. Il existe donc une relation claire entre les modèles de performance et la conscience de la situation. On peut donc prévoir qu'une meilleure compréhension des mécanismes favorisant la conscience de la situation est susceptible d'améliorer

grandement les modèles de performance existants, et partant, d'influencer la méthode de conception qui sera proposée. Il subsiste cependant plusieurs difficultés quant à l'exploitation de cette notion:

- Il y a des différences dans la définition même de ce qu'est la conscience de la situation parmi les chercheurs.
- Actuellement, il n'existe pas, à notre connaissance, de règles ou de principes validés empiriquement permettant de tirer avantage de cette notion lors de la conception d'IHM. Toutefois, plusieurs principes basés sur des considérations théoriques ont été proposés; les principes suivants ont été adaptés de (Endsley, 1995):
    - Fournir aux opérateurs de l'information pré-traitée et en rapport avec le but poursuivi plutôt qu'avec les éléments physiques du processus.
    - Mettre en évidence les indices perceptuels indiquant qu'on est en présence d'un cas prototypique (c.-à-d., un cas connu ou préalablement analysé).
    - Fournir une vue de l'ensemble des buts poursuivis par l'opérateur, tout en lui offrant la possibilité d'obtenir des informations plus détaillées sur un ou des buts spécifiques.
    - Offrir un soutien pour permettre à l'opérateur de prévoir l'évolution du processus.

Même si ces principes n'ont pas encore une forte base empirique, on constate qu'ils convergent avec les éléments communs identifiés à la suite de la revue des modèles de performance humaine. Ils confortent donc les choix qui ont été faits en ce qui a trait à ce que la méthode de conception d'IHM qui sera élaborée devrait permettre.

---

[15] Traduit de l'anglais « Situation Awareness ».

3.2 *Définition de tâches génériques de conduite*

Comme on l'a mentionné dans l'introduction de ce chapitre, on peut penser à un pairage naturel entre des types de tâches de conduite et des modèles (ou sources d'informations) du processus. Le problème revient donc à identifier des tâches qui soient suffisamment génériques et stables pour qu'il soit possible, et pratique, de leur associer des types d'informations. Heureusement, un tel ensemble de tâches a déjà été proposé par des chercheurs (Knaeuper, 1983; Rouse, 1983). Ces tâches correspondent à celles qui sont utilisées lors de la conduite d'un système de taille arbitraire, soit son démarrage, l'atteinte d'une allure de marche, son arrêt et le diagnostic qui peut être nécessaire en cours d'opération. De plus, ces tâches ont été validées expérimentalement lors d'une comparaison de la performance d'un programme informatique implantant le modèle de Rouse (décrit à la section 3.1) et de celle d'opérateurs humains contrôlant un système complexe simulé (Knaeuper, 1983).

Bien que ces chercheurs visaient à modéliser le comportement des opérateurs et non à fournir des outils pour concevoir des IHM, on a adapté leurs travaux pour les fins de cette recherche. On a toutefois pu préciser davantage les définitions qu'ils proposaient pour leurs tâches en considérant que chacune d'entre elles contribue à atteindre des objectifs de productivité et de sûreté des opérations. On montre ici les définitions originales de ces tâches; les précisions additionnelles qui ont été apportées ici sont indiquées en *italique*:

- La détection: définie originalement comme étant le processus par lequel un humain décide qu'un événement s'est produit. Cette tâche est normalement toujours active. *De façon plus précise, la tâche de détection consiste à déterminer s'il existe une menace envers un des objectifs poursuivis par l'opérateur lors de la conduite du processus.*
- Le diagnostic: défini comme le processus par lequel l'humain identifie la cause d'un événement. *Dans une perspective d'atteinte de buts, le diagnostic correspond à*

l'identification de l'origine d'une menace envers un des buts poursuivis par l'opérateur lors de la conduite du processus.

- La tâche de transition: définie comme le passage d'une région d'opération à une autre (p. ex., le démarrage d'un système, l'atteinte d'un niveau de production donné). On définit ici une région d'opération comme l'ensemble des valeurs des paramètres associés aux buts, sous-buts, sous-sous-buts, etc., poursuivis tout en continuant d'atteindre ces mêmes buts et sous-buts. Ce type de tâche fait normalement appel à des suites d'actions bien connues ou à une procédure. *En général, une tâche de transition se décompose en sous-tâches de transition correspondant aux sous-buts visés par la transition.*

- La compensation: définie comme le processus par lequel l'humain maintient un système en opération (dégradée, au besoin). On distingue deux classes générales d'événements, soit les événements anormaux ou les urgences, et les déviations importantes des variables par rapport à leur valeur désirée. Les réponses appropriées pour ces deux classes d'événements peuvent différer. Il faut aussi noter qu'il existe une interaction entre le diagnostic et la compensation. En effet, la compensation pour un symptôme peut rendre le diagnostic plus difficile. De plus, les deux tâches peuvent être complémentaires en ce que l'information recueillie pour accomplir l'une des deux tâches peut aider à exécuter l'autre tâche. *On peut aussi considérer que les tâches de compensation sont des cas particuliers des tâches de transition, quand elles exigent que des changements soient effectués aux consignes et aux paramètres normaux d'opération et donc entraînent une modification aux buts poursuivis. Par exemple, une panne d'une composante du processus peut entraîner une reconfiguration de ce dernier et un ajustement aux cibles de production.*

- La tâche d'optimisation où l'opérateur maintient ou améliore de façon mineure l'état actuel du système sans toutefois changer les consignes de production. Par exemple, l'opérateur peut modifier légèrement un réglage à des fins d'économie d'énergie ou

pour améliorer légèrement la qualité. Une tâche d'optimisation est normalement déclenchée par une application élémentaire de reconnaissance de forme (p. ex., l'opérateur constate qu'un indicateur est légèrement au-dessus de sa valeur optimale ou usuelle).

L'examen des tâches précédentes suggère qu'on peut en formaliser la séquence et l'organisation (Fiset, 1995); dans des termes familiers en analyse de la tâche, on dispose alors de « plans ». Le tableau suivant décrit donc les plans permettant d'articuler ces différentes tâches entre elles; de plus, et conformément aux similitudes qui ont été identifiées à la section 3.1 entre les modèles de performance des opérateurs, les plans tiennent compte des situations prévues et imprévues.

Tableau 3-1: Plan pour l'articulation des tâches génériques.

Tâche	Plan
Conduite (note: cette tâche a été ajoutée pour donner une structure d'ensemble aux tâches génériques).	Pour maintenir le processus dans la région d'opération courante, faire simultanément: - De façon constante, détecter si une menace à un ou plusieurs buts existe. ▪ Si une menace existe et que l'opérateur peut déterminer si une compensation appropriée existe, l'utiliser. ▪ Si une menace existe et que l'opérateur ne peut déterminer si une compensation appropriée existe, diagnostiquer la cause de la menace et utiliser la compensation appropriée. - Si l'opérateur reconnaît la présence d'une forme correspondante à une situation sous-optimale, optimiser le processus dans la région d'opération courante. Si on veut atteindre une nouvelle région d'opération, faire simultanément: - De façon constante, détecter si une menace à un ou plusieurs buts existe, en tenant compte de l'ajout et de l'abandon éventuels de buts causés par la transition. ▪ Si une menace existe et que l'opérateur peut reconnaître si une compensation appropriée existe, l'utiliser. ▪ Si une menace existe et que l'opérateur ne peut déterminer si une compensation appropriée existe, diagnostiquer la cause de la menace et utiliser une compensation appropriée. - Exécuter la ou les tâche(s) de transition appropriée(s).
Détection	Examiner les buts et déterminer si une menace à un ou plusieurs des buts existe.
Optimisation	Examiner les informations disponibles pour déterminer si une optimisation est possible ou requise; le cas échéant, effectuer l'optimisation.

Tableau 3-1: Plan pour l'articulation des tâches génériques. (Suite)

Transition	Si une transition prévue est requise, utiliser le plan prévu pour effectuer les sous-tâches de transition qui la composent. Si une transition imprévue est requise, élaborer un plan pour l'effectuer.
Compensation	Si une compensation prévue est requise, utiliser le plan prévu pour effectuer les sous-tâches de compensation qui la composent. Si une compensation imprévue est requise, tenter d'élaborer un plan pour l'effectuer.
Diagnostic	Examiner les facteurs affectant l'atteinte des buts pour déterminer lequel (ou lesquels) parmi ceux-ci en menace(nt) l'atteinte.

On dispose à ce point d'une architecture générique identifiant les tâches principales, et génériques, de conduite ainsi que la façon dont elles s'enchaînent; la figure suivante montre cette formalisation sous forme hiérarchique.

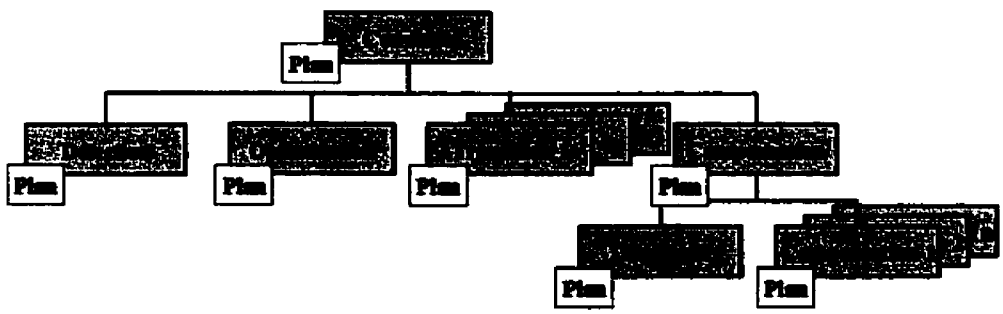


Figure 3-4: Représentation hiérarchique des tâches génériques.

Il faut noter que ces tâches génériques s'appliquent à un système de taille arbitraire. De la même façon qu'un tel système est décomposable en sous-systèmes, ces tâches génériques peuvent être définies pour ces sous-systèmes.

Il reste toutefois plusieurs questions à résoudre avant de pouvoir utiliser ce modèle pour définir les groupes d'informations et leur organisation lors de la conception d'IHM:

- La tâche de détection ne peut vraisemblablement pas être soutenue de façon efficace en exigeant de l'opérateur qu'il examine régulièrement chacune des données recueillies sur le processus, ne serait-ce qu'à cause du très grand nombre de ces variables et de la complexité de leurs interactions.
- Les modèles de performance humaine examinés à la section 3.1 ne fournissent que des indications générales sur le type d'informations requis pour soutenir l'exécution de chacune des tâches. Il faut donc définir de façon opérationnelle quelles sont ces informations de façon à permettre à un concepteur d'IHM de mettre en oeuvre la méthode.

Dans la prochaine section, on exploitera le modèle des tâches génériques pour intégrer divers éléments de la connaissance en vue de définir les types et l'organisation des informations qu'une IHM doit fournir pour soutenir adéquatement l'opérateur lors de l'atteinte des buts d'opération. On démontrera ainsi le pairage entre des types de tâches et des modèles du processus.

3.3 Intégration des connaissances avec les tâches génériques

La section précédente a permis d'identifier un modèle générique des tâches principales de conduite d'un opérateur. On exploite ici ce modèle en vue d'identifier, pour chacune des tâches génériques, le type et l'organisation des informations requises pour en soutenir l'exécution. On tient compte à la fois des besoins en informations liés aux caractéristiques des opérateurs et à celles du processus. De plus, là où cela est possible, on précise davantage la définition des tâches génériques. Enfin, il faut noter que le choix des moyens de présentation des types d'informations (p. ex., au moyen de graphiques de tendances ou autres) n'est pas effectué ici. Toutefois, on abordera cette question à la section 4.2.

3.3.1 Détection

Des études réalisées préalablement au développement des systèmes informatisés de conduite ont suggéré que les opérateurs surveillaient les processus complexes sur une base d'exception en réagissant aux alarmes fournies par un système de gestion d'alarmes (Dallimonti, 1972, cité dans Hoohnout et Zwaga, 1993). Cependant, des études plus récentes ont montré que la gestion par implication, où l'opérateur surveille de façon active divers paramètres pour anticiper l'évolution de la situation, est très fréquente et qu'elle peut même dominer (Hoonhout et Zwaga, 1993). Selon l'état et la stabilité du processus, l'opérateur peut utiliser l'un ou l'autre de ces modes de gestion, ou les deux simultanément. Ce point de vue est partagé par d'autres auteurs selon lesquels les experts sont capables d'anticiper le comportement du processus et y consacrent une partie appréciable de leur temps (Roth et Woods, 1988; Amalberti et Deblon, 1992).

Ces méthodes de surveillance sont susceptibles de poser des problèmes importants; en effet, un système informatisé utilisé pour la conduite d'un processus est en mesure de noyer l'opérateur sous un déluge de données, ce qui peut réduire ou même annihiler son habileté à détecter les anomalies. Il s'agit là d'un problème classique en contrôle de processus auquel plusieurs chercheurs se sont intéressés; une approche prometteuse semble être l'exploitation de modèles fonctionnels.

Un modèle fonctionnel représente, souvent sous forme arborescente bien que d'autres représentations existent, les buts, sous-buts, sous-sous buts, etc., poursuivis lors de l'opération d'un système. On dispose de plusieurs méthodes pour obtenir ce type de modèle, dont la technique d'analyse fonctionnelle de système FAST[16] (Bytheway, 1992), la technique de modélisation des flux multi-niveaux MFM[17] (Lind, 1990), et la technique

---

[16] De l'anglais « Function Analysis System Technique » (FAST).
[17] De l'anglais « Multi-Level Flow Modeling » (MFM).

de l'Arbre des Buts et des Chemins (ABC[18]) (Modarres et Cadman, 1986). Bien que ces méthodes visent toutes à élaborer un modèle fonctionnel, elles diffèrent quant au niveau de maturité qu'elles ont atteint et à leur facilité d'utilisation. Pour les fins de cette recherche, on a retenu l'ABC car il est relativement simple à comprendre et à élaborer, ce qui est un avantage important du point de vue du concepteur qui devra l'utiliser. De plus, il a été conçu spécifiquement pour des applications de systèmes complexes et il permet également de modéliser complètement un système arbitraire; enfin, ce type de modèle a été validé de façon exhaustive pour plusieurs types d'applications (Nordvik et al., 1994).

Un ABC est construit en identifiant, au niveau supérieur, le(s) but(s) principal(aux) poursuivi(s); on identifie ensuite les sous-buts en se demandant « Comment peut-on atteindre ce but? ». On retrouve normalement au niveau inférieur de l'ABC des fonctions plutôt physiques correspondant à des configurations d'équipement (des « chemins de succès ») permettant d'atteindre les buts du niveau supérieur. En général, un opérateur logique ET relie les buts et sous-buts, alors qu'un opérateur logique OU relie les chemins. En général, un ABC satisfaisant peut être construit pour un système complexe par une équipe multidisciplinaire. La figure suivante illustre un ABC simplifié pour la surveillance des paramètres principaux de sûreté d'une centrale nucléaire.

---

[18] Traduit de l'anglais « Goal-Tree Success Tree » (GTST).

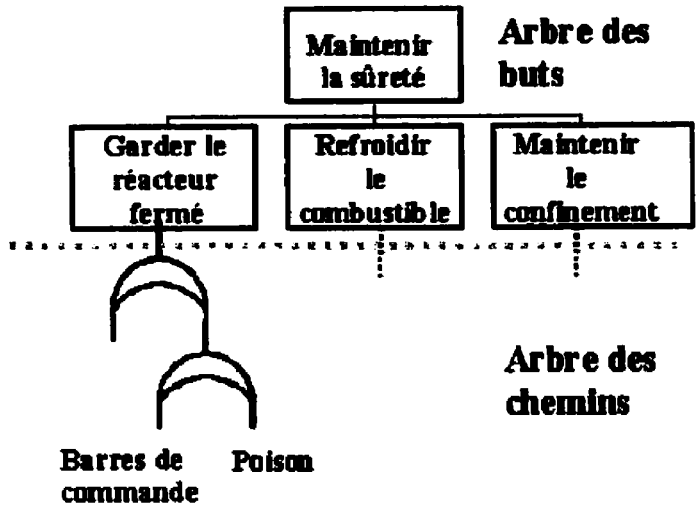


Figure 3-5: Exemple d'arbre des buts et des chemins.

À titre d'exemple, on peut évaluer l'atteinte de l'ensemble des buts relatifs à la sûreté d'une centrale nucléaire grâce à la surveillance d'un petit nombre de paramètres (de 25 à 30) relatifs à la performance des fonctions de haut niveau montrées dans la figure (Jones, Fiset et Lupton, 1993). Au lieu de tenter de suivre et d'interpréter les données individuelles fournies par le système informatique, il s'agit plutôt pour l'opérateur de surveiller l'atteinte des buts des niveaux supérieurs qui seront moins nombreux pour évaluer le fonctionnement global du processus.

Comme cette approche ne dépend pas de l'identification d'un certain nombre de défaillances préalablement définies, elle soutient la tâche de détection à la fois pour des cas prévus et imprévus. Ce type de modèle est aussi utile pour évaluer d'autres types de buts, et notamment ceux reliés à la productivité ou à l'efficacité d'une installation.

Diverses mises en oeuvre de l'ABC ont montré qu'il faut tenir compte des modes de fonctionnement du système (Pennings et Saussais, 1993); par exemple, l'atteinte de certains buts n'est pas pertinente à l'arrêt, mais le devient quand le processus est en opération. Ces auteurs ont donc introduit dans le modèle fonctionnel des « interrupteurs » permettant d'en délester des branches selon le contexte. Enfin, on peut

utiliser les liens entre les différents niveaux de fonctions pour propager dans le modèle les effets (incluant les délais) des défaillances des éléments des chemins et en prédire l'impact sur les buts d'opération.

L'exploitation d'un modèle fonctionnel est aussi compatible avec la surveillance par exception (p. ex., en montrant un indicateur « bon-mauvais » de la performance d'une fonction) et la surveillance par implication (p. ex., en fournissant à l'opérateur de l'information sur l'évolution des indicateurs de performance des buts de haut niveau).
Le tableau suivant résume, à partir des éléments identifiés dans cette section, les informations à fournir pour soutenir les tâches de détection.

Tableau 3-2: Informations à fournir pour soutenir les tâches de détection.

Cas prévus.	Cas imprévus.
• Soutenir la détection « par exception » en fournissant des indicateurs de type « bon-mauvais » de la performance des fonctions associées à l'atteinte des buts d'opération. • Soutenir la détection « par implication » en fournissant des informations sur l'évolution de la performance des fonctions associées à l'atteinte des buts d'opération. Fournir, pour chaque fonction, la valeur nominale souhaitée ainsi que les limites minimales, maximales, d'avertissement d'approche d'une limite, etc., correspondantes. • Dans les deux cas précédents, indiquer si les fonctions sont requises et disponibles selon la situation (p. ex., en allure de marche).	Idem.
Note: on ne donne pas d'indication sur le nombre de niveaux fonctionnels à afficher simultanément à l'opérateur car plusieurs autres facteurs (p. ex., nombre de moniteurs disponibles, nombre d'informations à évaluer) doivent être considérés.	

Enfin, et comme le plan montré au Tableau 2-2 l'indique, la détection est toujours active, même lorsque d'autres tâches sont en cours (par exemple, la transition). L'exploitation des informations fournies par le modèle fonctionnel lors de l'exécution de la tâche de détection permet donc à l'opérateur de déterminer, à tout moment, quel est l'état du processus et son évolution attendue en utilisant, par exemple, la détection par implication. Comme on le verra, cette omniprésence de la tâche de détection vient appuyer l'exécution des autres tâches génériques et ainsi simplifier la conception d'IHM.

3.3.2 Transition

On a déjà défini la tâche de transition comme consistant à faire passer un processus d'une région d'opération à une autre (voir section 3.2). On peut aussi considérer que la tâche de transition est normalement effectuée de façon intentionnelle ou prévisible. Ainsi, l'opérateur déterminera, ou recevra la directive, qu'il faut mettre en marche le processus, l'arrêter ou passer à de nouvelles consignes de production. Il dispose donc de temps pour faire le point, au besoin, en s'appuyant sur les informations obtenues lors de l'exécution de la tâche de détection.

On a déjà mentionné que l'exécution de ces types de tâches requiert la mise en oeuvre d'informations de nature procédurale. Plusieurs auteurs offrent des recommandations sur les aspects organisationnels et la rédaction de procédures pour des systèmes complexes (p. ex., voir Wieringa, Moore, et Barnes, 1998; Sutton, 1997). Cependant, ce type de recommandations est souvent limité aux aspects « rédactionnels » de la production de procédures et fournissent peu d'indication sur le type d'informations à inclure. Toutefois, quelques auteurs ont proposé des critères sur cet aspect (Dien, Montmayeul, Bozec et Lamarre, 1991), soit:

- Il faut prévoir plusieurs niveaux de lecture de la procédure, pour accommoder plusieurs niveaux de compétence des opérateurs. Ainsi, on peut distinguer un niveau

« objectifs », où seuls sont présentés l'identification et la chronologie des objectifs (pour l'opérateur expert), un niveau « tâches », donnant un niveau de détail plus important (p. ex., les moyens ou fonctions à mettre en oeuvre) destiné à l'opérateur intermédiaire, et un niveau « actions », très détaillé et destiné à un opérateur peu expérimenté.

- Il faut soutenir la formation dans l'utilisation de la consigne en présentant de façon intégrée les objectifs, les actions à engager, l'état du processus et son évolution attendue par rapport aux actions.

On peut aussi identifier d'autres éléments constitutifs d'une procédure pour ce type d'application, soit:

- La présence de conditions d'entrée (p. ex., est-ce que l'équipement ou l'approvisionnement requis sont disponibles?).
- La présence de conditions de sortie; dans le contexte où un modèle fonctionnel soutient l'exécution de la tâche de détection, les conditions de sortie sont normalement associées à l'atteinte des buts poursuivis pour la transition. Il peut s'agir de nouveaux buts, ou encore de changements à leurs valeurs nominales souhaitées et à leurs limites, ou encore de nouveaux buts qui deviennent pertinents pour la nouvelle région d'opération. L'opérateur peut donc déterminer la satisfaction de ces conditions au moyen du soutien reçu quand il exécute sa tâche de détection.
- La présence de conditions à maintenir après que la transition ait été complétée; ces conditions à maintenir sont associées aux nouvelles valeurs pour les buts existants ou aux nouveaux buts. Ici aussi, l'exécution de la tâche de détection par l'opérateur lui permet de s'assurer que les conditions à maintenir après la transition sont effectivement maintenues.

D'autres auteurs ont aussi montré que le fait de fournir aux opérateurs des procédures d'opération leur permettait de commander plus efficacement un processus simple (Kieras et Bovair, 1984). Le processus consistait en un ensemble d'éléments

(accumulateurs, survolteurs, interrupteurs) reliés entre eux et par lesquels l'opérateur devait faire transiter de l'énergie de façon à déclencher la mise à feu d'un système d'arme fictif. Le contexte était celui d'une station de travail utilisée dans l'émission télévisée « Star Trek ». Il faut noter que les composants du système correspondaient, dans cette étude, à des « boîtes noires » et que leur fonction de transfert était de type « binaire »; on a donc affaire à un réseau causal classique[19] ou encore à un digraphe. Les auteurs concluaient qu'en plus de procédures sur l'opération du système, il faut également fournir un modèle du système à commander aux opérateurs pour les aider à:

- apprendre comment opérer le système plus rapidement, et s'en souvenir de façon plus précise,
- exécuter les procédures d'opération du système plus rapidement, et simplifier ou améliorer ces procédures d'opération,
- inférer beaucoup plus rapidement et avec moins d'erreurs ces procédures, le cas échéant.

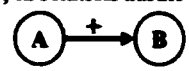
Les caractéristiques du modèle à fournir doivent inclure:

- les relations causales entre les composants et les commandes du système (Kieras et Bovair, 1984; Kieras, 1992),
- l'état (activé ou non) d'un composant et de ses connections (ou, respectivement, d'un noeud et de ses arcs dans un réseau causal), ainsi que le bon fonctionnement (ou non) d'un composant (Kieras, 1992).

Une autre étude a aussi montré comment ce type de modèles a entraîné une meilleure performance pour les tâches de contrôle où les diagrammes physiques ou structurels avaient été intentionnellement déformés et ré-arrangés pour correspondre aux flux de

---

[19] Un modèle causal, souvent appelé digraphe, est composé d'un ensemble de noeuds reliés par des arcs indiquant un gain positif ou négatif. Par exemple, l'exemple suivant indique une relation directe entre les variables A et B; si le gain avait été "-", la relation aurait été inverse.



masse ou d'énergie dans le processus (Vermeulen, 1987). Ce type d'utilisation du modèle causal met l'accent sur les relations entre les variables du processus, ce qui permet de s'en servir pour faire ressortir des liens n'apparaissant pas normalement sur les autres modèles. En effet, les opérateurs ne peuvent pas toujours inférer ces liens à partir des images utilisées usuellement pour ce type d'interfaces (Sanderson et al., 1989).

Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus par un autre auteur ayant examiné comment on pouvait modéliser les connaissances acquises par des opérateurs de chaufferies (Alengry, 1988; Alengry, 1989). Il est ressorti de ces études qu'on pouvait représenter le raisonnement d'un opérateur comme des manipulations de relations causales entre les évolutions des variables du processus. L'anticipation nécessaire à la conduite d'un système dépend de deux types d'activités de prévision. Dans un cas, l'opérateur peut exploiter des connaissances déjà acquises, dont des corrélations connues entre des variables (normalement consultées à partir de graphiques de tendances) ou encore des modèles prototypiques pour des cas donnés qu'il n'a pas besoin de déduire par raisonnement. Dans d'autres cas, cependant, il doit construire ces connaissances soit à partir des modèles causaux qu'il possède déjà (par propagation en chaînage avant de perturbations dans le modèle) ou encore par l'utilisation de modèles quantitatifs (p. ex., la force de la corrélation entre les variables). L'opérateur peut donc ainsi anticiper les conséquences de ses actions en plus de pouvoir expliquer les divers phénomènes observés.

En pratique, ce type de modèle n'est presque jamais disponible ou exploité sous forme « pure » dans les IHM industrielles. On en retrouve toutefois des éléments dans les diagrammes de flux de processus qui eux sont couramment utilisés et dans les schémas mécaniques, animés ou non, représentant les éléments physiques d'un système et leurs interconnections (p. ex., pompes, réservoirs, tuyaux). Enfin, dans certains cas simples,

on peut obtenir relativement aisément un modèle causal en combinant les informations tirées des diagrammes de flux et des schémas mécaniques et celles provenant d'équations ou de règles logiques décrivant le comportement des éléments du système. Par ailleurs, des auteurs ont conclu que la présentation de schémas mécaniques sur une IHM est particulièrement utile pour soutenir les tâches de commande et pour vérifier les actions posées sur le système (Siebert, Sicard, Thebault, 1988).

Plusieurs auteurs ont aussi étudié la progression de l'apprentissage d'un opérateur effectuant des transitions (démarrages, arrêts, changements de points de consigne) sur un système simulé (Crossman et Cooke, 1974 ; Moray, Lootsteen et Pajak, 1986). La figure suivante montre des résultats typiques pour deux types de sujets (novice et expert) tentant d'amener une variable à la valeur définie par une consigne donnée.

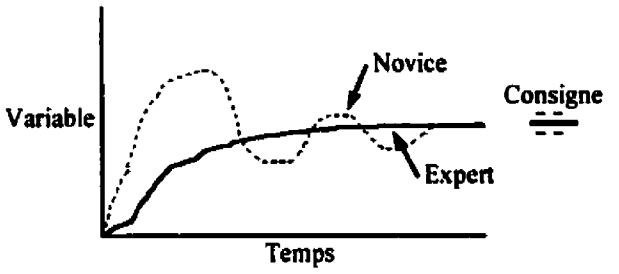


Figure 3-6: Performance d'un novice et d'un expert.

On constate d'abord que le novice fait osciller la variable commandée autour de la consigne, de façon semblable à un système de commande en boucle fermée, alors que l'expert a un comportement plus près d'une commande en boucle ouverte. De plus, le novice effectue plus de manipulations que nécessaire, alors que l'expert utilise moins d'actions de commande et agit sur moins de variables. Enfin, à force de pratique, le novice améliore sa performance jusqu'à atteindre un plateau où le processus est beaucoup plus stable. Les auteurs attribuent cette amélioration de performance est à:

- l'identification des relations entre les variables (p. ex., A influe sur B mais pas l'inverse),

- la détermination des gains approximatifs entre les variables (p. ex., un changement de 1 % sur A diminue la température de 2 °C), et
- la connaissance des délais entre les variables du système (p. ex., A produit un changement très rapidement sur B, mais très lentement sur C).

Il faut toutefois noter que:

- Même si un opérateur a atteint un niveau « expert » avec un sous-ensemble d'un système de grande envergure, il est vraisemblable, à cause de la nature des connaissances mises en cause, qu'il n'ait pas une performance experte pour un autre sous-ensemble arbitraire du système, ni pour une configuration différente du même sous-ensemble.
- Il est vraisemblable que tous les opérateurs n'atteignent pas un plateau de performance experte et que certains demeurent à un niveau sous-optimal pour une durée considérable.

Enfin, d'autres études permettent d'identifier des informations additionnelles à prévoir pour soutenir les tâches de transition:

- À cause de la variabilité de la charge de travail dans la conduite d'un système dynamique, une stratégie pour éviter les surcharges consiste à faire à l'avance quelques-unes des tâches qui seront nécessaires lors des épisodes à haute charge de travail (Xiao, Milgram et Doyle, 1992; Amalberti et Deblon, 1992).
- Les experts tendent à déployer plusieurs efforts, en phase de préparation ou même d'exécution de leur tâche, pour éviter de se retrouver en difficulté (Xiao et al., 1992; Amalberti et Deblon, 1992).
- Les opérateurs utilisent des trucs, indices, listes de vérifications, etc. pour s'assurer de rester en synchronisme avec le plan qu'ils tentent d'utiliser (Xiao et al., 1992; Amalberti et Deblon, 1992).

Le tableau suivant résume, à partir des éléments identifiés dans cette section, les informations à fournir pour soutenir les tâches de transition.

Tableau 3-3: Informations à fournir pour soutenir les tâches de transition.

Cas prévus.	Cas imprévus.
Pour chaque type de transition prévue, fournir à l'opérateur une procédure comprenant: • Les conditions d'entrée de la procédure. • Plusieurs niveaux de lecture de la procédure, soit un niveau « objectifs » identifiant les objectifs et leur chronologie, un niveau « tâches » donnant un niveau de détail plus important et un niveau « actions », très détaillé et destiné à un opérateur peu expérimenté. • Une intégration des objectifs, des actions à engager, de l'état du processus et son évolution attendue par rapport aux actions. • Des moyens facilitant aux opérateurs le maintien de leur synchronisme avec l'exécution de la procédure. • La possibilité pour l'opérateur d'exécuter à l'avance certaines étapes pour lui permettre de moduler sa charge de travail. Note: les conditions de sortie et celles à maintenir après la fin de la transition peuvent être intégrées dans le modèle fonctionnel pour être prise en charge par l'exécution de la tâche de détection. Fournir, de pair avec la procédure, un modèle du processus comprenant: • Les relations causales entre les composants et les commandes du système. Les composants devraient être disposés suivant l'écoulement des flux de masse ou d'énergie dans le processus plutôt que suivant la disposition des éléments physiques du processus. • L'état (activé ou non) d'un composant et de ses connections (ou, respectivement, d'un noeud et de ses arcs dans un réseau causal), ainsi que le bon fonctionnement ou non d'un composant. Fournir, soit dans la procédure ou dans le modèle: • Une approximation des gains entre les variables du processus. • Une approximation des délais entre les variables du processus et les commandes les affectant.	Soutenir l'élaboration d'un plan par l'opérateur en lui fournissant un modèle du processus comprenant: • Les mêmes informations que pour les cas prévus. • Une approximation des gains entre les variables du processus. • Une approximation des délais entres les variables du processus et les commandes les affectant.

3.3.3 Compensation

On a déjà mentionné que les tâches de compensation peuvent être considérées comme des cas particuliers des tâches de transition (voir section 3.2). Il est donc vraisemblable que l'on puisse soutenir ces tâches au moyen des mêmes types d'informations. Par ailleurs, une étude comparant l'utilisation de divers types de connaissances lors de la conduite d'un processus simulé n'avait pas relevé de différences dans l'habileté des sujets à diagnostiquer et compenser des pannes inconnues, peu importe le type de connaissances leur ayant été communiquées lors de la formation (Morris et Rouse, 1985), sauf pour la connaissance de procédures qui a résulté en une amélioration de la stabilité du système. Cette approche « procédurale » est aussi appuyée par d'autres travaux où on a trouvé que la préparation, à l'avance, de réponses et de points de décision (continuer, arrêter, faire A, etc.) en cas d'anomalies réduit la charge de travail de l'opérateur (Xiao et al., 1992; Amalberti et Deblon, 1992).

Il existe toutefois une différence importante entre les tâches de transition et celles de compensation. Alors qu'on a déjà proposé que les premières sont normalement exécutées de façon planifiée, une compensation fait normalement suite à une panne ou à une déviation importante par rapport à la situation visée. Comme les concepteurs du processus peuvent identifier a priori un certain nombre d'événements redoutés pour lesquels ils peuvent préparer des procédures de compensation appropriées, on peut alors disposer d'un moyen très puissant pour traiter ce type de situation. Cette approche est exploitée dans le domaine nucléaire sous le nom d' « approche orientée vers les événements » où elle a été utilisée de façon quasi-exclusive jusqu'à l'accident survenu à la centrale nucléaire de Three Miles Island aux États-Unis; elle est alors apparue insuffisante pour traiter les cas imprévus (Colquhoun, 1984). De façon générale, le problème se pose comme suit: si on dispose de « N » procédures événementielles, on est à la merci du « N + 1 ème » événement pour lequel on ne dispose pas de procédure. De plus, le choix de la procédure appropriée peut être compliqué du fait que la « signature »

d'un événement (correspondant ici aux conditions d'entrée de la procédure événementielle) peut être floue, du moins dans les premiers moments d'un accident. Enfin, cette approche est insuffisante quand plusieurs événements surviennent simultanément ou quasi-simultanément, à cause notamment de l'interaction pouvant exister entre les plans de compensation correspondants.

On a alors assisté à l'émergence d'une approche complémentaire appelée « approche orientée vers les symptômes » où on identifie des fonctions, généralement liées à la sûreté des installations, ainsi que des critères permettant de juger de leur atteinte (Corcoran, Porter, Church, Cross et Guinn, 1981; Colquhoun, 1984). Lors d'une situation anormale, les opérateurs tentent d'utiliser la procédure événementielle la plus appropriée, mais la procédure orientée vers les symptômes est aussi exploitée en parallèle pour pallier soit le choix erroné d'une procédure événementielle, soit une déficience de celle-ci, ou encore l'absence d'une procédure adaptée à l'événement en cours. Alors que les plans associés à l'approche orientée vers les événements proposent une compensation quasi-optimale pour une situation prévue, les compensations associées à une approche orientée vers les symptômes sont en général plus drastiques et visent la restauration, dans les meilleurs délais et avec tous les moyens requis, des fonctions de sûreté. On peut mieux situer ces deux approches et comprendre leurs impacts respectifs en s'appuyant sur des travaux de recherche portant sur la gestion d'anomalies et en s'appuyant sur l'ABC (section 3.3.1 et Figure 3-5). On peut en effet associer aux divers buts d'un modèle fonctionnel des plans pré-définis visant à contrer une menace à l'atteinte de ces buts (Chandrasekaran, Bhatnagar et Sharma, 1991). Selon ces chercheurs, un plan associé à un but de niveau inférieur a une action locale et exerce relativement peu d'influence sur les autres éléments du système. Par contre, un tel plan associé à un but de niveau très élevé est en général très puissant mais peut entraîner des conséquences lourdes pour l'ensemble du système. Il est alors vraisemblable que des événements correspondent plutôt à des buts de niveau moyen ou

bas dans l'ABC, où on peut les associer à des déficiences dans le chemin de succès associé à ces buts. La compensation appropriée correspond alors soit au rétablissement de ce chemin de succès, ou encore à l'activation d'un autre chemin de succès pour ce but. Toutefois, quand la perturbation remonte jusqu'aux niveaux supérieurs de l'ABC et qu'elle ne peut être gérée par une compensation pour un événement donné, on doit alors mettre en oeuvre un plan plus puissant mais ayant éventuellement des conséquences plus lourdes (arrêt prolongé des opérations, sollicitation intense de l'équipement, etc.). À partir des informations précédentes, on conclut que:

- On peut soutenir la tâche de compensation pour des cas prévus en fournissant à l'opérateur le même type de soutien que pour les tâches de transition prévues. Toutefois, et parce que la mise en oeuvre d'une compensation n'est pas planifiée (on ne planifie pas un incident ou un accident), il faut pouvoir indiquer à l'opérateur qu'une compensation existe parmi celles disponibles et qu'elle est appropriée à la situation incidentelle ou accidentelle qui prévaut.

- Le soutien des cas imprévus peut être assuré en élaborant une compensation ne visant pas à identifier l'événement en cause mais plutôt à restaurer l'atteinte des buts de sûreté pour le processus. La définition du contenu d'une telle compensation dépasse la portée de cette recherche; toutefois, le lecteur pourra trouver une excellente introduction dans (Corcoran et al., 1981).

Il faut aussi envisager la possibilité que ces procédures de compensation ne soient pas disponibles car leur développement demande un effort important. On peut y parvenir en examinant la partie droite du Tableau 3-3, qui montre quels types d'informations on doit fournir aux opérateurs pour leur permettre d'élaborer un plan pour exécuter une tâche de transition pour des cas imprévus. On suppose ici que ces mêmes informations pourront aider les opérateurs pour élaborer des plans pour soutenir des tâches de compensations, en l'absence des procédures déjà mentionnées. Toutefois, ces plans seront, selon toute vraisemblance, sous-optimaux par rapport à d'autres qui auraient été développés et validés préalablement pour faire face à ce genre de situations.

Enfin, il est important de noter la dépendance de la tâche de compensation envers celle de détection. Le déclenchement de la compensation dépend de la détection d'une menace à un des buts. De plus, c'est la tâche de détection et le modèle fonctionnel associé qui sont mis à contribution pour vérifier que la compensation prévue est efficace ou pour déclencher la mise en oeuvre de la compensation pour les cas imprévus et s'assurer de la restauration de l'atteinte des buts. Ceci permet de simplifier considérablement le soutien requis pour l'exécution de la tâche de compensation. Le tableau suivant résume les informations à fournir pour les tâches de compensation.

Tableau 3-4: Informations à fournir pour soutenir les tâches de compensation.

Cas prévus.	Cas imprévus.
• Indiquer à l'opérateur si les conditions d'entrée d'une procédure de compensation correspondant à un cas prévu (ou à un événement donné) sont satisfaites. • Si plus d'une procédure de compensation existe, indiquer à l'opérateur laquelle est la plus appropriée à la situation en cours. • Pour chaque type de compensation prévue, fournir à l'opérateur une procédure comprenant les mêmes éléments que ceux des cas prévus pour les tâches de transition.	• Indiquer à l'opérateur si les conditions d'entrée de la procédure de compensation orientée vers les symptômes sont satisfaites. • Fournir à l'opérateur une procédure comprenant les mêmes éléments que ceux des cas prévus pour les tâches de transition.
Si aucun plan de compensation n'est disponible, fournir l'information requise pour permettre à l'opérateur d'élaborer un plan et d'en évaluer le succès. Cette information comprend: • l'information pour l'élaboration d'un plan pour les transitions (cas imprévus) selon le Tableau 3-3; • les informations décrites au Tableau 3-2 pour le but menacé, même si celui-ci est subalterne par rapport aux buts de premier niveau.	

3.3.4 Diagnostic

Le diagnostic est un sujet qui a fait l'objet de plusieurs recherches dans le domaine du contrôle de processus. Toutefois, l'examen de la littérature montre que ce terme est défini de façon très différente entre les auteurs. Pour certains, il réfère à la détection d'une indication relative à une anomalie et y incluant, éventuellement, le processus allant de la détection initiale de l'anomalie jusqu'à l'identification complète de sa cause (p. ex., Morrison et Upton, 1994; Schaafstal, 1993). Pour d'autres, il s'agit de la compréhension de l'ensemble de la situation en vue de poser des actions sur le processus (Samurçay et Hoc, 1996). De plus, la diversité des causes et des effets étudiés rend problématique une intégration de ces résultats. Par ailleurs, sous l'hypothèse que la représentation des informations affecte la façon dont elles sont utilisées, les stratégies utilisées par des sujets lors d'un diagnostic dépendent pour une part importante des interfaces utilisées, ce qui limite la généralité des résultats de recherche.

En dépit de ces difficultés, l'examen de divers résultats de recherche a permis de raffermir la définition du diagnostic présentée à la section 3.2. On a en effet constaté que les chercheurs identifient généralement des étapes lors du diagnostic; ces étapes varient selon les auteurs. Par exemple, dans un cas, on distingue la détection de symptômes, la collecte d'informations complémentaires, l'élimination d'hypothèses non-plausibles et la confirmation d'une hypothèse (Morrison et Upton, 1994). Dans un autre cas, la liste des étapes consiste à détecter la présence de symptômes, en évaluer la gravité, identifier des causes possibles et les ordonnancer selon leur probabilité, les tester, identifier les moyens d'y remédier et les conséquences de ces mesures et évaluer si la situation s'est améliorée (Schaafstal, 1993). Le tableau suivant montre comment ces étapes sont prises en charge par l'exploitation des tâches génériques.

Tableau 3-5: Pairage entre les étapes de diagnostic et les tâches génériques.

Étapes (selon Schaafstal, 1993)	Étapes (selon Morrison et Upton, 1994)	Tâche(s) générique(s) correspondante
• Détection de la présence d'un symptôme	• Détection de symptômes	• Détection
• Évaluation de la gravité	• Collecte d'informations	• Détection (selon l'importance de la fonction pour laquelle une menace a été détectée)
• Identification et ordonnancement des causes	• Élimination d'hypothèses non-plausibles	• Diagnostic
• Test des causes possibles	• Confirmation d'une hypothèse	• Diagnostic
• Identification des moyens d'y remédier et des conséquences de ces mesures		• Compensation
• Évaluation de l'amélioration de la situation		• Détection

Les étapes qui correspondent à la tâche générique de diagnostic reviennent à identifier la cause d'un ou de plusieurs symptôme(s). Dans le contexte de cette recherche, le diagnostic vise moins à identifier la cause d'une anomalie en vue d'en effectuer la réparation (comme dans le cas d'une panne d'équipement) qu'à aiguiller l'opérateur sur les actions à prendre pour les cas où une activité de compensation ne peut être identifiée a priori. Ce point de vue a aussi été mis en évidence dans une étude portant sur le pilotage de chasseurs-bombardiers où les auteurs ont aussi constaté qu'il y a relativement peu de cas où le diagnostic « profond » est utilisé. Quand il est effectivement utilisé, il s'agit habituellement d'une fin de course où l'ensemble de solutions a été préalablement considérablement réduit (Amalberti et Deblon, 1992).

Dans le contexte de la définition du diagnostic adopté pour cette recherche, et encore dans une perspective fonctionnelle, on peut préciser le type d'informations requis pour soutenir cette tâche. La figure suivante servira à préciser les relations entre le modèle fonctionnel et le diagnostic.

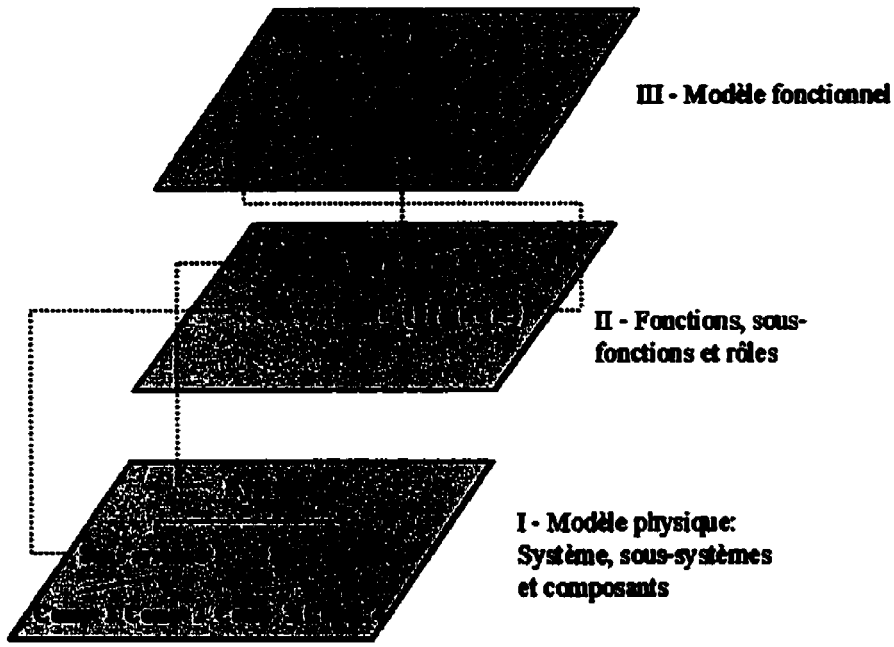


Figure 3-7: Relations entre modèle fonctionnel et diagnostic.

Au niveau I, on a une représentation à différents niveaux d'agrégation d'un système physique quelconque. Le système (partie inférieure de la figure) est composé de deux sous-systèmes. Chaque sous-système est élaboré à partir d'un assemblage de composants (p. ex., le sous-système 1 est composé de Comp. 1 et de Comp. 2).

Le niveau II représente, de façon abstraite, les fonctions et sous-fonctions potentielles offertes par chacun des systèmes et sous-systèmes. Ici, SS1 admet les sous-fonctions sf1, sf2 et sf3. En pratique, cependant, le concepteur du système physique n'utilise qu'une ou quelques-unes des fonctions ou sous-fonctions « potentielles » offertes par un système. Cette constatation s'applique aussi aux composants d'un système ou sous-système. Par exemple, le rôle assigné par le concepteur à une pompe peut être de

déplacer un fluide. Cependant, la pompe peut aussi assumer plusieurs autres rôles; par exemple, elle peut servir à pressuriser un circuit hydraulique, elle peut servir à augmenter l'enthalpie d'un fluide (qui résultera pour un liquide en une augmentation de sa température) en lui appliquant de l'énergie mécanique, etc. Dans la figure, les rôles et fonctions exploitées explicitement (au niveau II) par le concepteur du système sont indiqués en caractères gras et les autres rôles et fonctions sont en caractères ordinaires.

Le niveau III contient les fonctions effectivement utilisées par le concepteur pour atteindre les objectifs du système. À ce niveau, cette représentation correspond aux informations utilisées par les tenants de la conception d'imagerie basée sur une analyse structurelle du système physique (voir section 2.2). En principe, cette information est suffisante pour effectuer la conduite du système selon les hypothèses de conception. En pratique, cela peut ne pas être le cas. Par exemple, les stratégies de résolution de problèmes utilisées par les opérateurs ne sont pas considérées. De plus, cette représentation ne tient pas compte de l'expérience d'opération ou de contraintes imposées par une agence réglementaire. Par exemple, suite à l'accident de Three Miles Island, l'agence responsable de la réglementation pour l'exploitation de l'énergie nucléaire a imposé la surveillance de paramètres de sûreté qui n'avaient pas été prévus à la conception. On constate aussi que les niveaux I et III correspondent aux axes de la hiérarchie d'abstraction de Rasmussen.

On peut maintenant utiliser la perspective fonctionnelle pour formuler de façon plus claire la tâche de diagnostic; dans le cadre des tâches génériques, il s'agit d'une application de la tâche de détection d'une menace à un but à partir d'un niveau donné dans le modèle fonctionnel et ensuite récursivement à chacun des niveaux inférieurs. L'application récursive s'arrête quand un plan approprié (ou, de façon équivalente, une compensation) a été identifié, le cas échéant, ou lorsque la fonction à la source de la défaillance a été identifiée même si aucun plan approprié n'existe pour rétablir la

situation. Cette définition montre aussi comment on peut simplifier, en les ramenant à une simple détection de l'état des branches dans un arbre fonctionnel, les étapes correspondant à la tâche générique de diagnostic. Le tableau suivant résume les besoins en informations pour soutenir la tâche de diagnostic.

Tableau 3-6: Informations à fournir pour soutenir les tâches de diagnostic.

Cas prévus.	Cas imprévus.
Fournir: • L'ensemble de l'arborescence fonctionnelle avec des indicateurs de l'état des fonctions. • Les liens entre les fonctions d'un niveau et celles du niveau directement inférieur. • La valeur nominale souhaitée pour chaque fonction ainsi que les limites minimales, maximales, d'avertissement d'approche d'une limite, etc., correspondantes. • L'identification des fonctions requises selon la situation (p. ex., en allure de marche)	Idem.

3.3.5 Optimisation

On n'a pas relevé d'indications particulières dans la littérature sur le soutien à apporter aux tâches d'optimisation. Toutefois, on peut utiliser la définition de la tâche d'optimisation fournie à la section 3.2 pour identifier, en première approximation, les types d'information requis pour soutenir l'exécution de cette tâche.

D'abord, on identifie les informations qui déclencheront cette tâche. On peut ici s'appuyer sur l'évaluation du degré d'atteinte de certains des buts d'opération. En effet, malgré le caractère très local des tâches d'optimisation décrites ici, les paramètres optimisés doivent contribuer à l'atteinte de certains des buts d'opération. On peut alors

supposer que l'information utilisée pour évaluer l'atteinte de ces buts est pertinente pour déclencher les tâches d'optimisation correspondantes.

Comme le déclenchement d'une tâche d'optimisation résultera en des actions à poser sur le processus, on peut s'appuyer sur un des résultats présenté à la section 2.10 pour tenter d'identifier des caractéristiques du soutien à fournir. On rappelle ici ce résultat: « Il convient de minimiser le nombre d'images orientées vers la commande (et d') utiliser des dispositifs ayant la même apparence et le même comportement et localisés de façon similaire sur les images orientées vers la surveillance (et) celles orientées vers la commande ... ». Ceci implique de favoriser la ré-utilisation des images ou éléments d'images existants et utilisés ailleurs (p. ex., pour les tâches de transition et de compensation) plutôt que de créer des images pour satisfaire de façon ad hoc les exigences d'une tâche. Le tableau suivant résume les informations à fournir pour soutenir les tâches d'optimisation.

Tableau 3-7: Informations à fournir pour soutenir les tâches d'optimisation.

Cas prévus.	Cas imprévus.
• Fournir un accès aux informations permettant d'évaluer le degré d'atteinte des buts pour lesquels il est souhaité de permettre une optimisation locale. • Ré-utiliser, pour les commandes, les mêmes éléments d'images que ceux utilisés pour les tâches de transition et de compensation.	Idem.

Avec ce dernier tableau, on complète la définition des types d'informations à fournir pour soutenir les tâches principales de conduite. Au prochain chapitre, on fait la synthèse des éléments qui ont été identifiés jusqu'ici pour en tirer la méthode qui sera proposée.

CHAPITRE 4: SYNTHÈSE DE LA MÉTHODE PROPOSÉE

Au cours des chapitres précédents, on a identifié des éléments utiles à partir de méthodes ou d'études portant sur la conception d'IHM; on a aussi défini des tâches génériques de conduite de processus ainsi que les informations qui sont requises pour soutenir ces tâches. Dans ce chapitre, on complète la synthèse de la méthode qui sera proposée.

On décrit d'abord, à partir des éléments précédents, une architecture générique d'IHM. Ensuite, on montre comment cette architecture peut être mise en oeuvre pour des cas spécifiques; on discute aussi de l'incorporation de recommandations et de règles ergonomiques détaillées dans ces composants d'IHM. On complète ce chapitre en discutant brièvement des techniques qui peuvent être utilisées pour recueillir des informations, ou encore des sources d'informations qui peuvent être disponibles, de façon à faciliter la mise en oeuvre de l'architecture.

4.1 Architecture générique d'IHM

Pour élaborer une architecture générique en tenant compte, d'une part, de la structure des tâches génériques et, d'autre part, des résultats de la revue de la littérature, on a d'abord regroupé ces éléments et on a établi les liens entre eux. Ces liens ont été établis sur la base des informations contenues dans les Tableaux 3-2, 3-3, 3-4, 3-6 et 3-7, ainsi que dans la synthèse des informations présentée à la section 2.10.

La figure suivante montre le résultat de cette première étape.

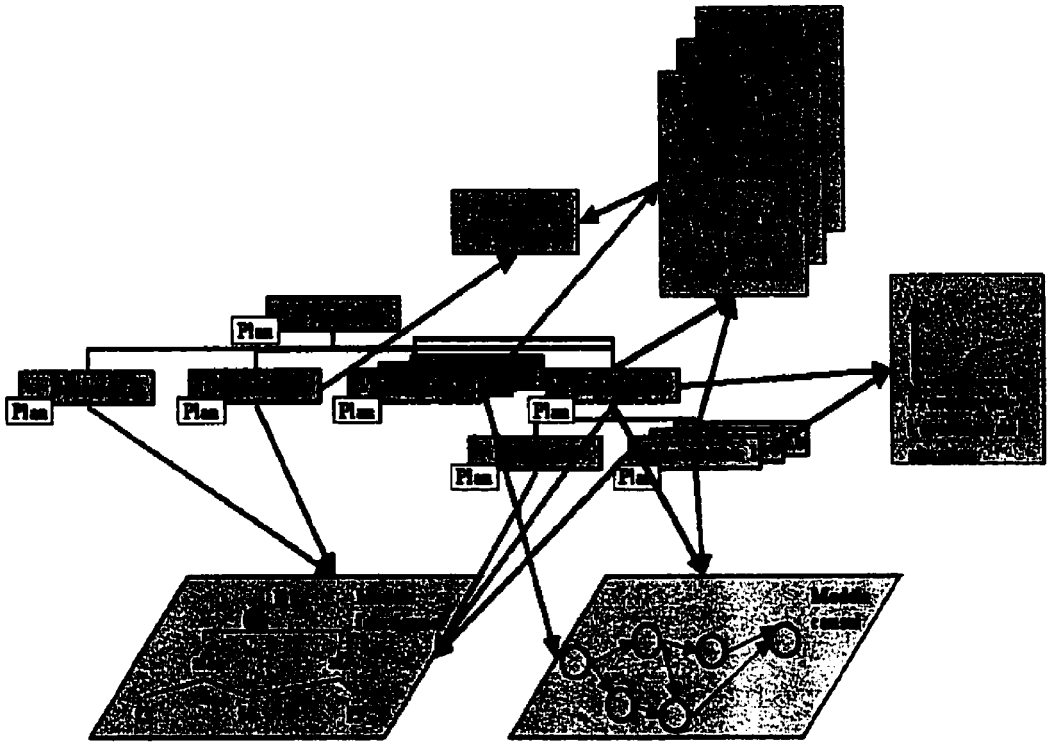


Figure 4-1: Regroupement et identification des liens entre les tâches et leurs groupes d'informations.

Après avoir identifié les groupes d'informations requis et en avoir explicité les liens, on doit en définir l'organisation, c'est-à-dire, quand ils sont requis. Cette définition s'appuie sur les plans régissant l'articulation des différentes tâches génériques entre elles et qui ont été définis à la section 3.2.

Le tableau suivant résume les règles pour déterminer quand rendre disponibles ces différents groupes d'informations pour les différentes tâches génériques. Ces règles distinguent le cas où des informations doivent être toujours présentes (elles ne peuvent être occultées), celui où elles doivent être disponibles (normalement, sur demande de l'opérateur), et celui où l'information doit être offerte à l'opérateur (celui-ci peut alors l'utiliser s'il le juge à-propos).

Tableau 4-1: Règles régissant l'organisation des informations.

Tâche générique	Règles pour déterminer quand rendre disponible un groupe d'informations
Détection et diagnostic	• L'information permettant de juger de l'atteinte des objectifs (tâche de détection), en utilisant une gestion par exception, doit toujours être présente. • L'information permettant de juger de l'atteinte des objectifs, en utilisant une gestion par implication, doit être disponible. On justifie ce choix par la taille des dispositifs qui seront vraisemblablement requis pour soutenir ces tâches et par le fait que l'espace d'affichage est souvent limité. En général, un indicateur pour la gestion par exception (de type « bon-mauvais ») peut être très compact et utiliser moins d'espace qu'un ensemble d'informations (p. ex., un graphique de tendances) permettant de juger de l'évolution des paramètres affectant l'atteinte d'un but. On soutient donc ainsi toujours au moins partiellement la tâche de détection, tout en permettant à l'opérateur d'allouer une partie des ressources disponibles (p. ex., un écran) à une détection par implication.

Compensation	• En cas de menace à un but, les informations et commandes relatives à la tâche de compensation appropriée doivent être offertes à l'opérateur (cas prévus, Tableau 3-4).
	• S'il n'est pas possible d'identifier immédiatement la compensation appropriée, il faut rendre disponibles:
	  • les informations soutenant le diagnostic de la menace à l'atteinte du but, ET
	  • celles permettant de choisir une compensation appropriée OU celles permettant d'élaborer un plan et les commandes permettant de l'exécuter, si une compensation n'existe pas (voir le Tableau 3-4).

Tableau 4-1: Règles régissant l'organisation des informations. (Suite)

Tâche générique	Règles pour déterminer quand rendre disponible un groupe d'informations
Optimisation	• Quand l'opérateur veut juger de la conduite optimale d'un processus ou l'optimiser, les informations et les commandes requises pour cette tâche doivent être disponibles.
Transition	• Dans le cas d'une transition ou d'une compensation prévue ou imprévue, les informations relatives à la transition doivent être disponibles avant le début de la tâche (cas prévus ou imprévus, Tableau 3-3). • De plus, il doit être possible d'exécuter du travail préparatoire si l'opérateur le juge à-propos, par exemple, en vue de mieux répartir sa charge de travail.
Autre	• En tout temps, toutes les informations ou commandes du système doivent être disponibles. On justifie cette règle par la reconnaissance du fait que tout n'est pas entièrement prévisible en conduite de processus. Par exemple, il est possible que l'opérateur veuille confirmer une information ou exécuter une manoeuvre qui n'avait pas été prévue pour une transition donnée.

Les règles précédentes dépendent évidemment de leur contexte d'utilisation. Par exemple, si l'IHM prévue ne permet que de surveiller un processus, sans possibilité de réglages, toutes les règles relatives aux transitions ou à la compensation sont éliminées; toutefois, celles relatives au diagnostic sont conservées. On définit donc l'architecture d'IHM comme étant constituée de(s):

- L'ensemble des tâches génériques de conduite qui doivent être soutenues par l'IHM et des groupes d'informations qui leur sont associés tels que montrés à la Figure 4-1 et aux Tableaux 4, 5, 6, 8 et 9.
- Règles régissant l'organisation de l'information telles que montrées au Tableau 4-1.

On inclut aussi les règles supplémentaires suivantes tirées de la section 2.10 (on rappelle ici ces règles):

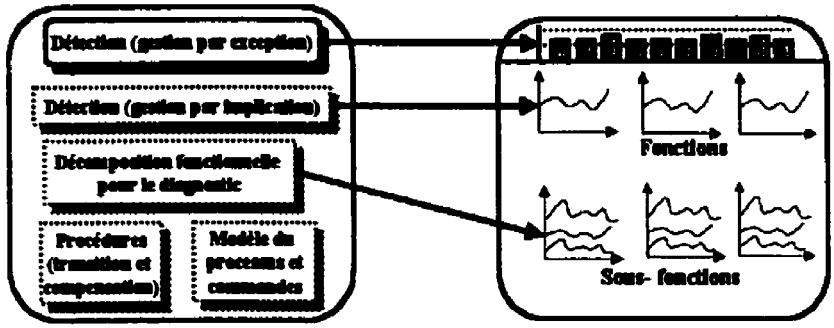
- Il convient de minimiser le nombre d'images orientées vers la commande pour développer et maintenir l'habileté de l'opérateur à utiliser les autres images qu'il aura à exploiter pour les situations imprévues (section 2.9).
- Utiliser des dispositifs ayant la même apparence et le même comportement et localisés de façon similaire sur les images orientées vers la surveillance, celles orientées vers la commande et les autres, pour faciliter l'utilisation des différents types d'images par l'opérateur (section 2.9).

On référera dorénavant à la méthode proposée comme étant la méthode Tagci (Tâches et architecture générique pour la conception d'interfaces).

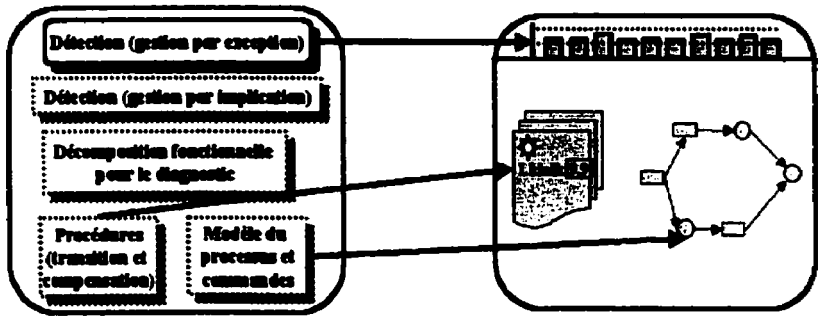
4.2 Mise en oeuvre de Tagci

La mise en oeuvre de Tagci consiste à associer des composants d'IHM aux groupes d'informations qui ont été définis précédemment. Idéalement, le concepteur devrait disposer d'un ensemble de composants contenant de façon « pré-compilée » les recommandations et règles pertinentes pour soutenir chacune des tâches de l'opérateur. En effet, et comme on l'a expliqué à la section 2.10, il est inefficace de laisser au concepteur le fardeau d'identifier et d'appliquer toutes les recommandations et règles ergonomiques pertinentes pour des composants spécifiques d'IHM.

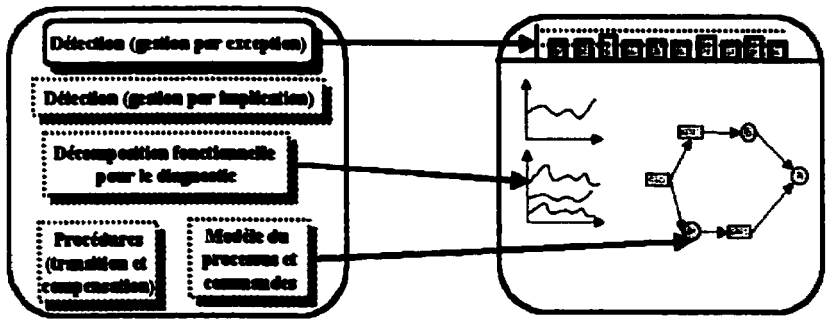
Bien que la définition exhaustive de ces composants, de leurs caractéristiques et des règles définissant leur pairage avec les groupes d'informations dépasse largement la portée de cette recherche, la figure suivante montre un exemple d'un tel pairage dans un cas où un seul écran est utilisé pour soutenir les tâches de l'opérateur.



a – détection et diagnostic



b – détection et transition (ou compensation) prévues



c – détection et transition (ou compensation) imprévues

Figure 4-2: Exemple de pairage entre les groupes d'informations Tagci et des composants d'IHM.

La partie de gauche des figures constitue, de façon concrète, la contribution de Tagci à la conception d'IHM. Dans un premier cas, montré à la partie (a) de la figure, l'image de droite montre le résultat du pairage entre les composants d'IHM et les groupes d'informations soutenant:

- La gestion par exception (tâche de détection). Ici, ce pairage est effectué au moyen

des graphiques à barres (en haut de l'image) permettant d'évaluer l'atteinte des buts d'opération ou, de façon équivalente, la bonne performance des fonctions associées.

- La gestion par implication (tâche de détection). On utilise à cette fin des graphiques de tendances pour évaluer l'évolution des paramètres permettant de juger de l'atteinte ou non des buts d'opération.

- Le diagnostic, au moyen des graphiques de tendances, pour les sous-fonctions associées aux fonctions. Dans ce cas, on montre les variables correspondantes aux sous-fonctions soutenant la fonction principale; une variation d'une ou plusieurs de ces variables expliquera la variation du paramètre associé à la fonction.

Dans le second cas, montré à la partie (b) de la figure, l'image de droite montre le pairage entre les composants d'IHM et les groupes d'informations soutenant:

- La gestion par exception (tâche de détection), soutenue de la même façon que pour le cas précédent. C'est la conséquence directe d'une des règles portant sur l'organisation de l'information pour la tâche de détection du Tableau 4-1.

- La transition et la compensation prévues, au moyen d'une procédure et d'un modèle du processus.

Enfin, dans le troisième cas, montré à la partie (c) de la figure, l'image de droite montre le pairage entre les composants d'IHM et les groupes d'informations soutenant:

- La gestion par exception (tâche de détection), soutenue de la même façon que pour le cas précédent.

- La détection et la compensation imprévues, soutenues au moyen des informations sur l'atteinte de buts d'opération et d'un modèle du processus.

Évidemment, le même exemple pourrait être fait pour les cas où le concepteur dispose de deux, trois ou plus de moniteurs. Par ailleurs, on aurait pu choisir d'autres composants d'IHM pour montrer les informations; la figure suivante montre quelques

choix additionnels qui auraient pu être faits pour soutenir la gestion par exception pour la tâche de détection.

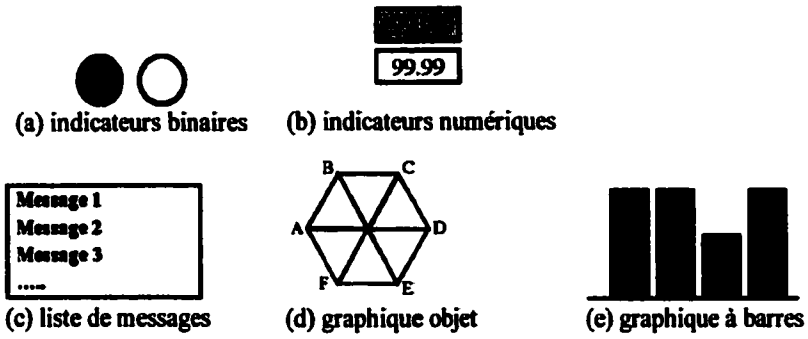


Figure 4-3: Choix additionnels pour la tâche de détection (gestion par exception).

Il existe un très grand nombre de recommandations et de règles ergonomiques portant sur la conception de plusieurs de ces dispositifs (voir, par exemple, Gilmore, Gertman et Blackman, 1989; Beare, Gaddy et Taylor, 1991; Department of Defense, 1996; NASA, 1996). Il existe aussi quelques critères permettant au concepteur de choisir entre la plupart de ces dispositifs; ces critères sont toutefois incomplets car la conception et l'utilisation de certains d'entre eux font encore l'objet de recherches (p. ex., voir Yu et Behrens, 1995, pour les graphiques objets ainsi que Potter et Woods, 1991, pour les listes de messages). De plus, les avantages relatifs de certains dispositifs par rapport à d'autres ne sont pas, à l'heure actuelle, toujours clairement établis. Par exemple, vaut-il mieux utiliser des graphiques à barres, des indicateurs binaires ou un graphique objet pour soutenir la détection? La clarification et l'opérationalisation de ces critères, combinés à l'emploi de Tagci, ouvriraient la porte à une conception semi-automatisée d'IHM.

4.3 Collecte des informations

Conceptuellement, Tagci est relativement simple. Toutefois, son exploitation demande que le concepteur collecte plusieurs informations. On a toutefois tenté de minimiser le

travail requis en identifiant des techniques de collecte ou des sources d'informations qui sont susceptibles de lui faciliter la tâche. Le tableau suivant montre ces techniques et ces sources pour chacun des éléments de Tagci.

Tableau 4-2: Techniques de collecte ou sources d'informations.

Élément de Tagci	**Techniques de collecte ou sources d'informations.**
Détection et diagnostic	• ABC (voir section 3.3.1). • Matériel d'appoint: manuels d'ingénierie ou techniques, manuels d'opération. • Expert(s) du domaine (opérateur, superviseur, formateur).
Transition	Pour les procédures: • Procédures de démarrage, d'arrêt, de changement de consignes de production existantes. • Analyse hiérarchique de la tâche. Pour le modèle du processus: • Diagramme de flux de masse ou d'énergie. • Équations décrivant le fonctionnement du processus. • Expert(s) du domaine (opérateur, superviseur, formateur).
Compensation	• Procédures de conduite incidentelles ou accidentelles. • Analyse hiérarchique de la tâche. • Expert(s) du domaine (opérateur, superviseur, formateur).
Optimisation	• Analyse hiérarchique de la tâche. • Expert(s) du domaine (opérateur, superviseur, formateur).

De plus, la conception détaillée des images peut s'appuyer sur les recommandations et règles ergonomiques détaillées mentionnées à la section précédente.

CHAPITRE 5: VALIDATION DE LA MÉTHODE TAGCI - SITUATIONS NORMALES

On présente ici la méthode utilisée et les résultats obtenus lors de la validation expérimentale de Tagci pour les situations normales où les éléments composant le processus fonctionnent normalement et se comportent de la façon prévue à la conception.

5.1 Objectifs

La validation de la méthode Tagci a été faite par le biais d'une étude expérimentale comparative qui visait à déterminer si une interface basée sur cette méthode est supérieure à une interface conventionnelle par rapport aux objectifs suivants:

- atteinte des objectifs de productivité,
- maintien des conditions de sûreté du processus,
- maintien du processus dans un état stable, avec un minimum de fluctuations de ses variables contrôlées et manipulées,
- maintien d'une charge de travail acceptable pour les opérateurs.

5.2 Méthodologie

Cette section décrit la méthodologie utilisée pour réaliser la validation expérimentale. On décrit d'abord le processus qui a été utilisé aux fins expérimentales, les tâches pour lesquelles les interfaces ont été comparées et les interfaces qui ont été utilisées par les sujets. On décrit alors les caractéristiques de ces derniers. On discute ensuite des critères d'évaluation et on décrit le design expérimental et la procédure qui ont été utilisés. Enfin, on présente les résultats qui ont été obtenus.

5.2.1 Processus

On a choisi une adaptation du processus de Crossman (Crossman et Cooke, 1974) comme processus servant à la validation expérimentale. On a toutefois modifié la structure du processus et on a ajouté des étapes pour son opération afin de complexifier la tâche des opérateurs et se rapprocher d'une situation réelle. La figure suivante décrit ce processus.

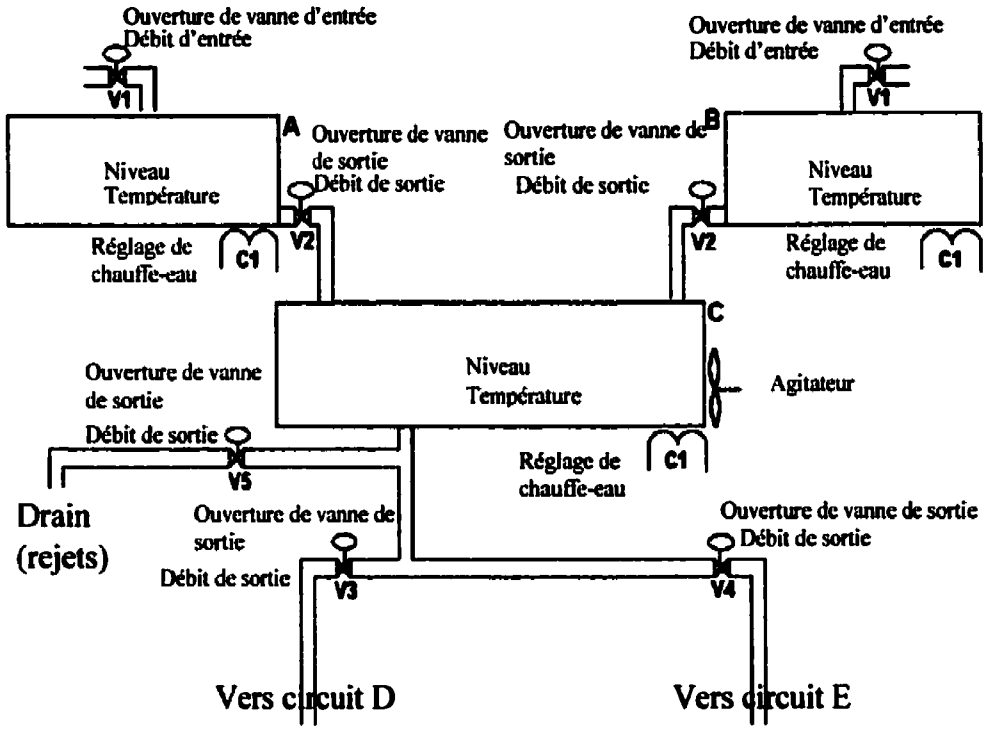


Figure 5-1: Adaptation du système de Crossman.

Le processus compte deux réservoirs (A et B) de matières premières, comportant chacun une vanne d'entrée (V1), une vanne de sortie (V2), et un élément chauffant (C1). Ces réservoirs se déversent dans un réservoir de mélange (C) équipé d'un agitateur et d'un élément chauffant. C'est dans ce réservoir que le mélange du produit fini est effectué, à une proportion et à une température données. Une vanne de sortie vers un drain (V5) est aussi disponible. Quand le produit fini a les caractéristiques (proportion, température et agitation) voulues, il est acheminé vers les circuits de transit

(D, E) par l'entremise de vannes de sortie (V3 et V4). Ce processus est doté des caractéristiques de sûreté suivantes:

- Dans tous les réservoirs, il faut maintenir un niveau minimal pour faire fonctionner l'élément chauffant. Si le niveau est insuffisant, l'élément chauffant est coupé automatiquement et ne peut être ré-enclenché tant que le niveau n'est pas au-dessus du seuil minimal. De plus, la vanne de sortie du réservoir affecté est fermée.
- Dans tous les réservoirs, il faut maintenir le niveau sous un seuil maximal. Si le niveau est trop élevé, la (les) vanne(s) d'alimentation est (sont) fermée(s) automatiquement et ne peut(vent) être ouverte(s) tant que le niveau n'est pas au-dessous du seuil maximal.
- Dans le réservoir C, il faut que le niveau soit au-dessus du niveau minimal pour que l'agitateur puisse être mis en marche de façon à éviter qu'il ne s'emballe.

Une description complète des composants et de l'opération du système se trouve dans les documents de formation fournis aux sujets et apparaissant à l'annexe A. Par ailleurs, les équations ayant servi à modéliser le processus sont présentées à l'annexe B.

Lors de la validation, l'opérateur devait maximiser la production tout en respectant des consignes de qualité du produit fini (proportions et température) et de stabilité des niveaux des réservoirs. Plusieurs raisons ont motivé le choix de ce processus pour cette validation expérimentale:

- Il correspond à la définition donnée précédemment pour un processus complexe (plusieurs variables avec des interactions entre elles, relations temporelles entre les variables, objectifs de conduite multiples et quelquefois conflictuels, et risque).
- Il a été utilisé comme véhicule expérimental par plusieurs auteurs (Moray et al., 1986 ; Sanderson et al., 1989; Pawlak et Vicente, 1994), de sorte qu'on peut envisager l'élaboration d'un corpus de connaissances facilitant la mise en commun et la comparaison des résultats expérimentaux entre les chercheurs.

- Selon nos propres observations, et en accord avec les résultats de divers auteurs (Moray et al., 1986; Vicente, Christophersen et Hunter, 1996), la maîtrise de ce processus est suffisamment difficile pour que certains sujets ne développent pas de stratégies de conduite optimales sans aide bien que tous parviennent, éventuellement, à l'opérer. La conduite du processus est donc suffisamment complexe pour permettre de comparer les effets des deux types d'interfaces.

5.2.2 Tâches

Pour cette validation, on a choisi de comparer les interfaces pour les tâches les plus fréquentes qu'un opérateur est susceptible de rencontrer en situations normales, soit:

- La détection, où les sujets devaient s'assurer que les buts suivants étaient atteints:
  - maintien des niveaux minimum et maximum dans les réservoirs A, B et C à l'intérieur des limites,
  - maintien de la proportion et de la température à l'intérieur des limites pour les cibles communiquées aux sujets.

  De plus, et comme c'est souvent le cas pour la conduite de systèmes complexes, les sujets devaient tenter d'atteindre un but secondaire et partiellement conflictuel avec les précédents; en effet, après que ceux-ci avaient été atteints, les sujets devaient maintenir les niveaux dans les réservoirs stables et près de 2 m.
- La transition (cas prévu), où les sujets devaient amener le processus d'une région d'opération initiale à une région d'opération cible. Ainsi, au début de chaque essai, l'ouverture des vannes d'alimentation et d'évacuation des réservoirs A et B avait été fixée de façon à ce que les niveaux dans ces systèmes soient stables et à environ 2 m et que la proportion et la température du mélange dans le réservoir C soient respectivement de 50 % et de 10 °C. Les vannes d'évacuation du réservoir C étaient fermées. Les sujets devaient alors utiliser les différentes commandes du système pour

atteindre les consignes qui leur avaient été communiquées.

- L'optimisation, où les sujets pouvaient effectuer des réglages minimes pour se rapprocher des valeurs cibles. Il faut noter que l'optimisation demeure, pour une large part, à la discrétion du sujet. Ce dernier peut décider d'effectuer une optimisation, par exemple, pour se rapprocher d'un niveau moyen cible ou d'une valeur de proportion ou de température de façon à se donner une marge de sécurité en cas de perturbation du processus. Toutefois, tant que les buts poursuivis sont atteints, le sujet n'est pas forcé d'effectuer cette tâche.

5.2.3 Interfaces comparées

On a utilisé des règles de conception pour éviter que la comparaison entre les interfaces ne soit biaisée; ces règles sont les suivantes:

- Les interfaces contiennent les mêmes informations, sauf pour celles dont on veut spécifiquement évaluer la pertinence. Les informations communes aux interfaces sont:
  - Pour les réservoirs A et B: l'ouverture des vannes d'entrée et de sortie (de 0 à 100 %) et les débits d'entrée et de sortie (de 0 à 0,1 m^3/s), le niveau du liquide dans le réservoir (de 0 à 4 m), le réglage du chauffe-eau (de 0 à 10 000 Watts), la température du liquide dans le réservoir (de 0 à 20 °C).
  - Pour le réservoir C: le niveau (de 0 à 4 m), la température (de 0 à 20 °C), la proportion des éléments provenant des réservoirs A et B (en %), le réglage du chauffe-eau (de 0 à 10 000 Watts), l'ouverture des vannes de sortie vers le drain et les circuits D et E (de 0 à 100 %).
- Les interfaces présentent aussi un rappel des consignes de température et de proportion à atteindre, ainsi que la production cumulative atteinte pour l'essai, et le temps écoulé depuis le début de l'essai.

- On a utilisé le même code de couleurs pour l'identification des alarmes (p. ex., dans le cas d'un niveau trop bas ou trop élevé dans un réservoir). Ce code est: vert (valeur à l'intérieur des limites d'avertissement), jaune (valeur entre les limites d'avertissement et les limites absolues) et rouge (valeur à la limite absolue ou au-delà).
- On utilise aussi un code de couleurs pour indiquer l'état de l'agitateur. Le code utilisé est: vert (agitateur en marche) et rouge (agitateur à l'arrêt).
- On a utilisé une même taille et police de caractères pour les deux interfaces, ainsi qu'une même taille pour les graphiques de tendances.
- Pour chacune des interfaces, les informations étaient présentées sur un écran couleur de 17 pouces, d'une résolution de 1024 * 768 pixels, et en occupaient toute la surface.

Suite à l'adoption de ces règles, on a élaboré les deux interfaces. L'IHM 1 contient les éléments que l'on retrouve usuellement dans les interfaces traditionnelles pour ce type de processus; cette interface est montrée à la figure suivante.

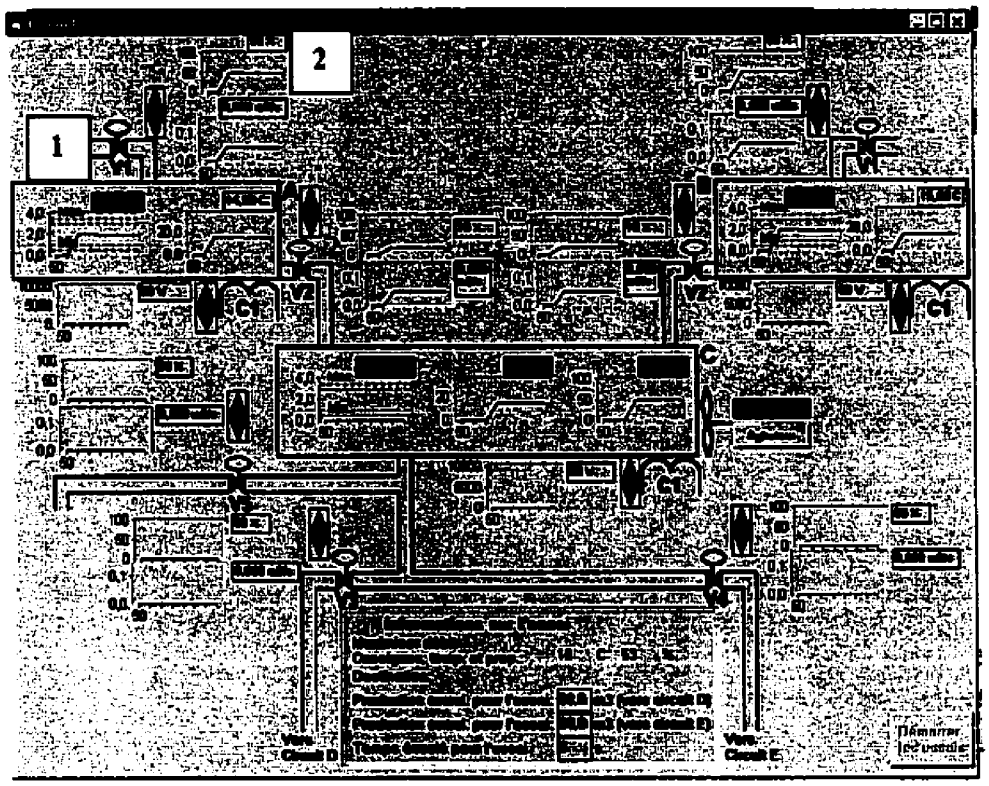


Figure 5-2: IHM 1 (traditionnelle).

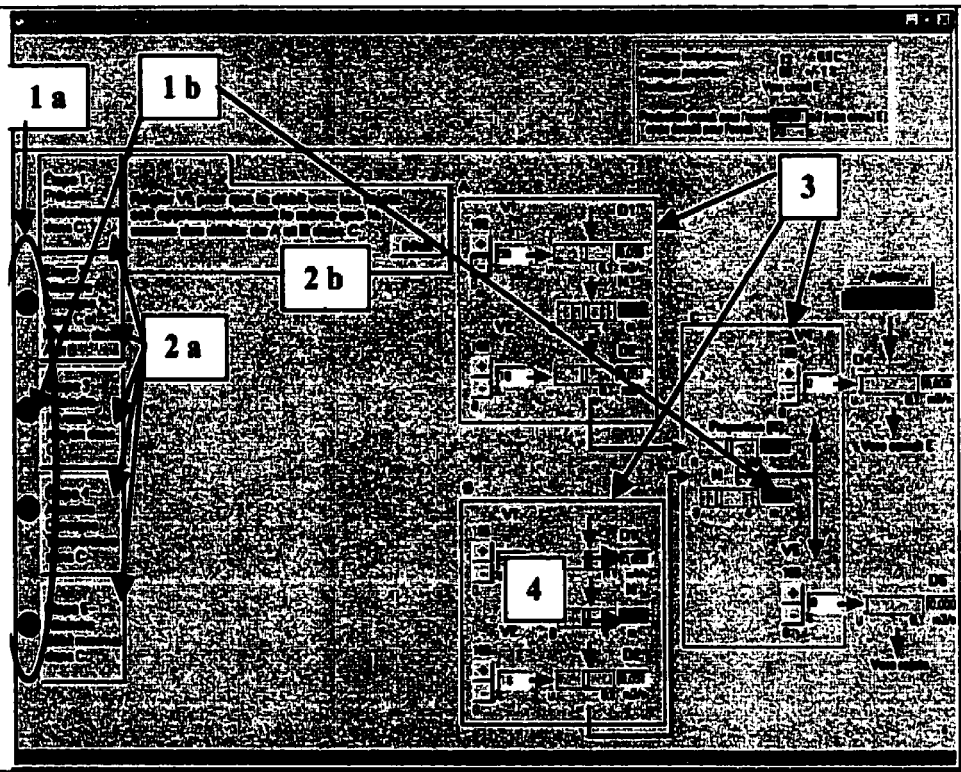
On y retrouve:

- Les éléments structuraux du processus tels que les réservoirs, les vannes (p. ex., voir 1 dans la figure), les chauffe-eau ainsi que les tuyaux les reliant.
- L'ensemble des variables lues par le système informatisé; ces variables sont présentées simultanément, à la fois numériquement et sur des graphiques de tendances correspondant aux 50 dernières lectures (voir 2 dans la figure). Ceci est en accord avec la philosophie « une mesure - un affichage » qui est couramment utilisée dans ce type d'images (voir la section 2.1.3). De plus, la consultation de ces informations s'effectue sans avoir à naviguer dans l'interface.
- Une zone d'information où on affiche les consignes, la production cumulative et le temps pour l'essai en cours.

- Les boutons de réglage ( ) situés à proximité des vannes et des chauffe-eau servent à ajuster ces dispositifs. Un clic sur un bouton change le réglage du dispositif de 1% (pour une vanne) ou de 100 W (pour un chauffe-eau).
- Le code de couleurs décrit précédemment est utilisé pour indiquer l'état des paramètres suivants: les niveaux des réservoirs A, B et C, la proportion du mélange et la température dans le réservoir C.

Cette interface servira de point de référence. Par ailleurs, le tableau suivant montre et explique le contenu de l'IHM 2 qui a été élaborée au moyen de la méthode Tagci.

Tableau 5-1: Définition de l'interface élaborée avec la méthode Tagci.



Tâche à soutenir	Groupes d'informations et dispositif(s) d'interaction à fournir.
Détection (gestion par exception)	On fournit des indicateurs « bon-mauvais » de la performance des fonctions associées à l'atteinte des buts d'opération, selon le Tableau 3-2 (voir 1a dans la figure); l'état de ces indicateurs correspond à celui des autres indicateurs (p. ex., voir 1b pour le lien entre l'indicateur d'atteinte du but et la mesure du niveau du liquide dans le réservoir C).
Détection (gestion par implication)	On fournit des informations sur l'évolution de la performance des fonctions associées à l'atteinte des buts d'opération, selon le Tableau 3-2 (voir le bouton « Détails » du coin inférieur droit de 2b dans la figure qui donne accès à des graphiques de tendances, similaires à ceux de l'IHM 1).
Transition (cas prévu)	On fournit une procédure, selon le Tableau 3-3 (voir 2a dans la figure); la procédure fournie offre deux niveaux, où le premier niveau (inclus dans chacun des boutons) correspond à un ordonnancement des buts principaux à atteindre et le second niveau (voir 2b dans la figure) correspond à un ensemble d'étapes pour atteindre le but principal. Pour exploiter la procédure, l'opérateur appuie sur le bouton correspondant au but qu'il veut atteindre et met en oeuvre les étapes proposées au moyen du panneau de commandes qui lui est fourni. Ce panneau comprend un modèle du processus (selon le

Tableau 5-1: Définition de l'interface élaborée avec la méthode Tagci. (Suite)

Tâche à soutenir	**Groupes d'informations et dispositif(s) d'interaction à fournir.**
Transition (cas prévu, suite)	Tableau 3-3) correspondant aux éléments montrés dans la portion de droite de l'interface (p. ex., voir 3 dans la figure). Un panneau est fourni pour soutenir l'atteinte de chacun des buts de la procédure (le panneau montré est utilisé pour les commandes associées à l'écoulement de la masse; un panneau similaire est utilisé pour les commandes associées à l'écoulement de l'énergie). On affiche aussi sur ces panneaux les valeurs numériques des variables reliées aux buts. Il faut noter que les buts d'opération peuvent être atteints de façon asynchrone pour permettre aux sujets de moduler l'exécution de la procédure. De plus, alors que les indicateurs montrant l'atteinte des buts principaux fournissent une vue d'ensemble du processus, le sujet peut examiner la valeur des variables associées à ces buts en naviguant vers le panneau approprié (soit celui pour l'écoulement de la masse ou de l'énergie). On fournit une approximation des gains entre les variables du processus (selon Tableau 3-3); on indique dans le modèle du processus l'influence d'une commande sur le système, ce qui fournit une approximation grossière du gain entre les variables. Par exemple, l'interface indique par une flèche de couleur qu'une augmentation de l'ouverture de la vanne V1 du réservoir B résulte en une augmentation du débit d'entrée et du niveau dans le réservoir B (voir 4 dans la figure). Par ailleurs, et contrairement à la recommandation du Tableau 3-3, on n'a pas fourni d'approximation des délais entre les variables du processus et les commandes les affectant. On a choisi de ne pas fournir cette information pour montrer que la méthode est utilisable et peut être profitable même si le concepteur ne peut satisfaire tous les besoins en informations qui sont identifiés.
Optimisation	On doit ici: • Fournir un accès aux informations permettant d'évaluer le degré d'atteinte des buts pour lesquels il est souhaité de permettre une optimisation locale (selon Tableau 3-7). On y parvient en rendant disponibles sur les panneaux de commande les valeurs numériques correspondant à l'atteinte des buts. • Ré-utiliser les mêmes éléments d'images que ceux utilisés pour les tâches de transition et de compensation (selon Tableau 3-7).

Comme pour l'IHM 1, l'IHM 2 occupait toute la surface de l'écran. De plus, on a fait appel aux règles supplémentaires proposées dans la méthode Tagci (section 4.1) de la façon suivante :

- On minimise le nombre d'images orientées vers la commande pour développer et maintenir l'habileté de l'opérateur à utiliser les autres images qu'il aura à utiliser pour les situations imprévues en utilisant le même modèle causal et physique intégré pour plusieurs étapes de la procédure (au lieu d'avoir un modèle plus optimal et taillé sur mesure pour chaque étape). De plus, on utilise le même modèle pour les tâches d'optimisation.
- On utilise le même modèle causal pour satisfaire à l'exigence d'utilisation de dispositifs ayant la même apparence et le même comportement et localisés de façon similaire sur les images orientées vers la surveillance, celles orientées vers la commande et les autres en vue de faciliter l'utilisation des différents types d'images par l'opérateur.

Enfin, on remarque qu'on a inclus aucune représentation des éléments physiques composant le processus, à la différence de l'IHM 1 (p. ex., il n'y a pas de représentation, même stylisée, de vannes ni de réservoirs). Bien que l'on n'exclut pas a priori l'importance de ce type d'informations, la littérature est ambiguë sur les bénéfices tangibles de cette représentation. Pour ces raisons, on ne l'exploite pas à ce stade de développement de la méthode Tagci.

5.2.4 Sujets

On a fait appel à deux groupes de 10 sujets chacun; le premier groupe (6 hommes, 4 femmes, âge moyen: 21,2 ans) utilisait l'IHM 1, et le second groupe (6 hommes, 4 femmes, âge moyen: 21,9 ans) utilisait l'IHM 2. Pour chacun des groupes, les sujets provenaient de classes de deuxième et de troisième année de baccalauréat en génie

industriel à l'École Polytechnique de Montréal. La sélection des sujets satisfaisait aux exigences suivantes:

- pas d'expérience préalable comme opérateur pour la conduite de systèmes industriels ni d'études de ce type de tâche lors de cours,
- familiers avec l'environnement Windows et avec l'utilisation de la souris,
- pas de daltonisme.

5.2.5 Critères d'évaluation et design expérimental

L'évaluation de la performance pour des tâches de supervision et de commande de système complexe présente des difficultés particulières tenant, entre autres, à:

- La diversité de solutions possibles et acceptables permettant à un opérateur d'atteindre ses objectifs, et donc la difficulté d'évaluer la qualité de la solution utilisée par un opérateur pour effectuer une manoeuvre donnée. Par exemple, la rapidité avec laquelle on atteint une valeur cible n'est pas un critère suffisant, car on ne tient pas compte des contraintes appliquées sur le système, alors qu'en situation réelle, il est souvent très important d'éviter ou de minimiser l'usure prématurée de l'équipement.
- La difficulté d'évaluer la maîtrise d'un système par l'opérateur, en terme de son utilisation efficace des mesures et commandes à sa disposition.

Ces difficultés ont souvent été évoquées dans la littérature sans qu'une approche globale d'évaluation d'interface n'ait émergée. Pour les fins de cette recherche, on a choisi de concentrer l'évaluation sur la mesure de l'atteinte des objectifs identifiés au début de ce chapitre, ce qui a amené la définition des paramètres expérimentaux suivants:

- On veut comparer expérimentalement deux types d'IHM en faisant réaliser à un groupe de sujets par type d'interface les mêmes tâches (ces dernières ont été définies à la section 5.2.2) et en effectuant diverses mesures en rapport avec les objectifs

définis à la section 5.1.

- Quelques tests informels ont permis de conclure qu'une durée de 15 minutes par essai expérimental était suffisante pour permettre à des novices de maîtriser le processus, après quelques essais. On a donc fixé la durée de chaque essai à 15 minutes. De plus, on a limité à quatre le nombre d'essais dans une session de travail pour réduire l'effet de la fatigue et faciliter la recherche de sujets. En effet, il faut ajouter au temps requis pour les essais environ 35 à 50 minutes pour communiquer à chaque sujet la formation initiale requise (voir la section 5.2.6), ce qui amène la durée totale de cette session à près de deux heures.

- On a choisi de faire effectuer aux sujets une seconde session de quatre essais et d'effectuer les mêmes mesures. On a contrôlé l'effet éventuel de l'intervalle entre les deux séances en utilisant les règles suivantes:

  - un sujet ne pouvait pas effectuer les deux sessions d'essais durant la même journée,
  - un sujet devait effectuer les deux sessions d'essais à l'intérieur d'une période de sept jours.

  Ces essais additionnels visaient à évaluer l'évolution de leur performance au fur et à mesure de l'augmentation de leur familiarité avec le processus et l'interface. De plus, l'expérience que les sujets acquéraient sur la maîtrise du processus lors de situations normales devait les préparer à la validation lors de situations incidentelles.

  Durant chaque session d'essais, on a utilisé des cibles dont les valeurs ont été choisies de façon à forcer les sujets à effectuer des transitions de la même ampleur sur le processus (p. ex., augmenter ou diminuer la température de 3 °C), dans le but de présenter une difficulté équivalente entre les essais. Le tableau suivant montre les cibles utilisées pour chacun des essais.

Tableau 5-2: Valeurs pour les cibles utilisées lors des essais.

Essai	Cible de température, C	Cible de proportion, %, calculé comme suit: % = (ingrédient A / (ingrédient A + ingrédient B)) * 100
A	7	60
B	13	40
C	13	60
D	7	40

De plus, les cibles pour les essais réalisés à l'intérieur d'une session ne se répétaient pas pour éviter que les sujets ne les mémorisent. Toutefois, on ré-utilisait les mêmes cibles (mais dans une séquence différente) pour la seconde série d'essais. Le tableau suivant montre les séquences d'essais utilisées.

Tableau 5-3: Séquence des essais.

Sujet	Session 1 (essais 1 à 4)	Session 2 (essais 5 à 8)
1	Formation A + B + C + D	B + C + D + A
2	Formation B + C + D + A	C + D + A + B
3	Formation C + D + A + B	D + A + B + C
4	Formation A + B + C + D	B + C + D + A
5	Formation B + C + D + A	C + D + A + B
6	Formation C + D + A + B	D + A + B + C
7	Formation A + B + C + D	B + C + D + A
8	Formation B + C + D + A	C + D + A + B
9	Formation C + D + A + B	D + A + B + C
10	Formation C + D + A + B	C + D + A + B

On a utilisé les critères et techniques suivants pour mesurer l'atteinte de chacun des objectifs:

- L'atteinte des objectifs de productivité requis en mesurant la production totale de produit fini des opérateurs, en m^3/s, à la fin de chaque essai.

- Le maintien des conditions de sûreté du processus en mesurant l'évolution du nombre de mises en action (« déclenchements ») des systèmes de sûreté assurant que le niveau dans chacun des réservoirs ne dépasse pas les limites maximales (pour éviter les débordements des réservoirs) ou minimales (pour éviter les surchauffes de l'équipement), au cours de chaque essai. Lorsqu'un niveau franchit une de ces limites, le système de sûreté coupe automatiquement l'alimentation ou l'évacuation du réservoir, de façon à prévenir respectivement un débordement ou une surchauffe de ce dernier; on parle alors d'un déclenchement du système de sûreté. De façon plus générale, on peut considérer qu'un déclenchement, dans le cadre de cette expérimentation, correspond à l'atteinte par le processus d'un état indésirable, susceptible d'entraîner des conséquences néfastes.

- Le maintien du processus dans un état stable en mesurant le nombre de commandes utilisées par l'opérateur pour atteindre et maintenir l'atteinte des buts d'opération. On définit ici une commande comme un changement effectué par l'opérateur sur l'ouverture d'une vanne ou d'un chauffe-eau; quand plusieurs changements sont faits en série (p. ex., lors d'une action répétée et ininterrompue, à la hausse ou à la baisse, sur une vanne), on considère qu'il ne s'agit que d'une même commande. Ce type de mesure a déjà été utilisé par d'autres auteurs (Crossman et Cooke, 1974; Moray et al., 1986). De plus, comme on l'a montré à la Figure 3-6, un opérateur expert (et efficace) utilise moins d'actions de commande qu'un autre opérateur pour atteindre et maintenir une consigne donnée. Cette relation de causalité entre le nombre de commandes et la stabilité du système est directe, car en l'absence de pannes, la plupart des états du système sont dus aux commandes de l'opérateur; un plus grand

nombre de commandes entraînera donc un plus grand nombre de changements d'états du système et donc une plus grande instabilité.

- Le maintien d'une charge de travail acceptable pour les opérateurs, en mesurant l'évolution de la charge mentale de travail de ces derniers. Pour y parvenir, on a utilisé, suite à une revue de la littérature sur différentes méthodes et leur efficacité (Wierwille et Eggemeier, 1993; Hill, Iavecchia, Byers, Bittner, Zaklad et Christ, 1992), la méthode d'évaluation globale de la charge mentale de travail. Cette méthode est simple d'utilisation et permet d'obtenir des résultats globaux de façon plus constante que la plupart des autres méthodes (Hill et al., 1992). Elle consiste à obtenir d'un sujet, sur une échelle donnée, son évaluation subjective de la charge de travail globale à laquelle il a été soumis durant un essai.

On obtient donc un design expérimental simple (2 types d'IHM * 2 sessions), avec mesures répétées sur les sujets, pour chacune des variables de réponse suivantes: production totale, déclenchements, charge de travail et nombre de commandes utilisées. Comme chaque session compte quatre essais, on a des mesures répétées durant chacune des sessions; pour tenir compte de cette répétition et simplifier l'analyse, on a sommé, pour chaque variable de chaque sujet, les valeurs des résultats obtenus durant chaque session (p. ex., pour le sujet 1, la charge mentale durant une session est la somme des charges durant chacun des essais). Enfin, on a utilisé la méthode Manova pour analyser les résultats; on montre et on discute de ces derniers dans les sections qui suivent. Les détails de l'analyse sont montrés à l'annexe C.

5.2.6 Procédure expérimentale

Au début de la première session de travail, on a rappelé à chaque sujet les objectifs de la recherche sans toutefois les informer du groupe (interfaces 1 ou 2) auquel ils appartenaient.

Chacun des sujets a reçu, de façon individuelle, la même formation sur la finalité et la structure du système, ainsi qu'une formation spécifique sur l'utilisation de l'interface qu'il devait utiliser. La formation comprenait:

- Un document décrivant la finalité du système et sa structure, ainsi que le fonctionnement de l'interface; ce document a été lu sur place par chaque sujet; comme on l'a mentionné, cela durait de 35 à 50 minutes, bien qu'aucune limite de temps n'ait été fixée aux sujets. Un exemplaire de chacun des documents est montré à l'annexe A.
- Une démonstration portant sur la manipulation de l'interface par l'expérimentateur, suivie de quelques manipulations simples effectuées par le sujet; on avait eu soin d'arrêter la simulation numérique pour ne pas fournir d'indice sur le comportement du système.
- Les réponses de l'expérimentateur aux questions de chaque sujet, le cas échéant, soit suite à la lecture du document ou à la démonstration, ou encore lorsque le sujet se familiarisait avec l'interface.

On n'a mentionné à aucun des sujets les techniques ou heuristiques utiles pour commander le processus. Les sujets ont été payés pour leur participation à l'expérience suivant le taux de salaire minimum en vigueur. De plus, ils ont touché un bonus variant de 0 à 50 % du taux horaire en vigueur durant l'essai, selon leur atteinte d'un quota de production fixé pour chaque essai; le quota était le même pour chacun des essais. On a aussi signé une entente de confidentialité avec les sujets à l'effet que leurs résultats de performance personnelle ne seraient pas divulgués, et on a insisté pour qu'ils ne discutent pas entre eux des essais auxquels ils avaient participé.

Après la formation, l'expérimentateur a expliqué les consignes de proportion et de température à atteindre, et on a lancé les essais. La durée de chaque essai et la collecte d'informations étaient entièrement automatisées. À la fin de chaque essai, le système

informatique informait le sujet que l'essai était terminé, lui demandait d'évaluer sa charge mentale de travail et lui communiquait les cibles du prochain essai.

5.2.7 Système informatique

Les deux interfaces, ainsi que la simulation numérique correspondant au processus, ont été programmées en Visual Basic. Le programme tournait sur un PC de type Pentium. Le seul dispositif d'interaction utilisé était une souris.

Par ailleurs, on s'est assuré que les temps de réponse de chacune des interfaces aux commandes des opérateurs étaient similaires. La simulation tournait une fois par seconde; toutes les données et commandes étaient sauvegardées dans une base de données, pour chacun des essais, à chaque seconde.

5.3 Résultats

Cette section décrit les résultats qui ont été obtenus lors des essais en situations normales. On présente d'abord les résultats globaux, et on examine ensuite en détails chacun des résultats spécifiques.

5.3.1 Résultats globaux

Les cellules du tableau suivant montrent, pour chacune des variables, la moyenne de chaque variable pour chaque groupe et, entre parenthèses, l'écart-type.

Tableau 5-4: Moyennes et écarts-types, situations normales.

	Production totale (m^3)		Nombre de déclenchements		Nombre de commandes utilisées		Charge mentale	
IHM	Session 1	Session 2	Session 1	Session 2	Session 1	Session 2	Session 1	Session 2
1 (traditionnelle)	189,783 (101,00)	398,98 (121,56)	8,10 (10,75)	1,50 (2,72)	525,90 (95,90)	435,80 (111,65)	2788,70 (917,87)	1488,40 (940,31)
2 (Tagci)	144,44 (77,48)	327,28 (95,74)	3,20 (3,39)	2,10 (2,60)	399,20 (78,09)	390,60 (76,11)	2291,35 (748,96)	1348,99 (885,76)

On constate d'abord une très forte variabilité dans les données recueillies, comme le montrent les écarts-types très élevés pour plusieurs des variables (p. ex., le nombre de déclenchements, la production, et la charge mentale).

Un examen plus poussé fait aussi ressortir plusieurs relations entre des variables. Le tableau suivant montre les valeurs des corrélations partielles entre les variables ainsi que le degré de confiance associé à ces corrélations (entre parenthèses). Les résultats significatifs sont indiqués en caractères gras.

Tableau 5-5: Corrélations partielles entre les variables, situations normales.

		Production totale		Nombre de déclenchements		Nombre de commandes		Charge mentale	
	Session	1	2	1	2	1	2	1	2
Production totale	1	1,00	**0,71 (0,001)**	**-0,57 (0,01)**	**-0,45 (0,05)**	-0,09 (0,73)	-0,34 (0,15)	-0,36 (0,13)	-0,38 (0,11)
	2		1,00	-0,20 (0,41)	**-0,43 (0,07)**	-,07 (0,79)	-0,32 (0,18)	-0,11 (0,64)	-0,29 (0,23)
Nombre de déclenche-ments	1			1,00	0,22 (0,36)	**0,49 (0,03)**	0,08 (0,74)	**0,47 (0,04)**	0,18 (0,44)
	2				1,00	0,07 (0,78)	0,35 (0,14)	-0,14 (0,56)	-0,03 (0,89)
Nombre de commande s	1					1,00	**0,41 (0,08)**	0,15 (0,53)	-0,25 (0,29)
	2						1,00	0,12 (0,61)	0,01 (0,97)
Charge mentale	1							1,00	**0,67 (0,002)**
	2								1,00

On constate que:

- La production totale lors de la deuxième session d'essais est fortement corrélée avec la production totale atteinte par les sujets lors de la première session. Cette production est aussi négativement corrélée, pour chaque session, avec le nombre de déclenchements des systèmes de sûreté, ce qui est vraisemblable étant donné l'effet perturbateur d'un déclenchement (fermeture de vannes, d'éléments chauffants, etc.).

- Lors de la première session d'essais, le nombre de déclenchements est corrélé positivement avec le nombre de commandes utilisées ainsi qu'avec la charge mentale de travail. Cette corrélation avec le nombre de commandes subsiste, mais de façon moins forte (0,35), au second essai.

- Le nombre de commandes utilisées par les sujets pour atteindre les objectifs est corrélé positivement entre la première et la seconde série d'essais. Ceci suggère que les sujets utilisant plus de commandes lors de la première session d'essais sont susceptibles de continuer d'en utiliser plus lors de la seconde session.
- Enfin, la charge mentale est aussi fortement corrélée entre la première et la deuxième session d'essais. Ceci suggère aussi que les sujets ressentant une forte charge mentale lors de la première session d'essais sont susceptibles de continuer à ressentir une charge mentale élevée lors de la seconde série d'essais.

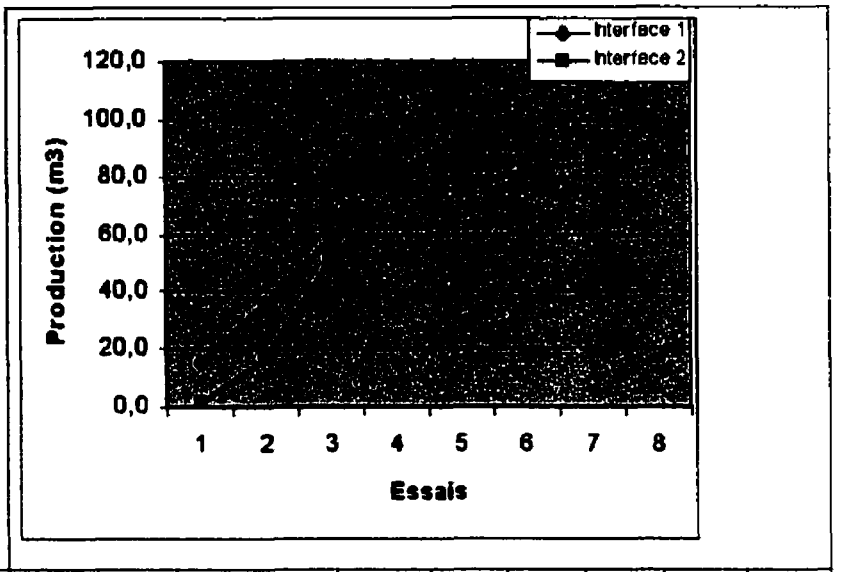
Par ailleurs, l'analyse Manova sur l'ensemble des variables a révélé que l'effet du type d'IHM était significatif ($p < 0,0484$) par rapport à l'ensemble des variables dépendantes. On note aussi un effet significatif de la session ($p < 0,0001$), ce qui indique la présence d'apprentissage de la part des sujets.

On a alors procédé à une analyse en utilisant la technique Manova pour chacune des variables dépendantes. Dans les sections suivantes, on présente et on discute des résultats obtenus pour chacune de ces variables.

5.3.2 Production totale

Le tableau suivant montre les résultats obtenus par chaque groupe de sujets, pour chacun des essais; il s'agit de la quantité de produit fini, correspondant aux impératifs de proportion et de température, qui a été acheminée à la sortie du réservoir C (note: les résultats sont en m^3 de produit fini).

Tableau 5-6: Production totale, interfaces 1 et 2.

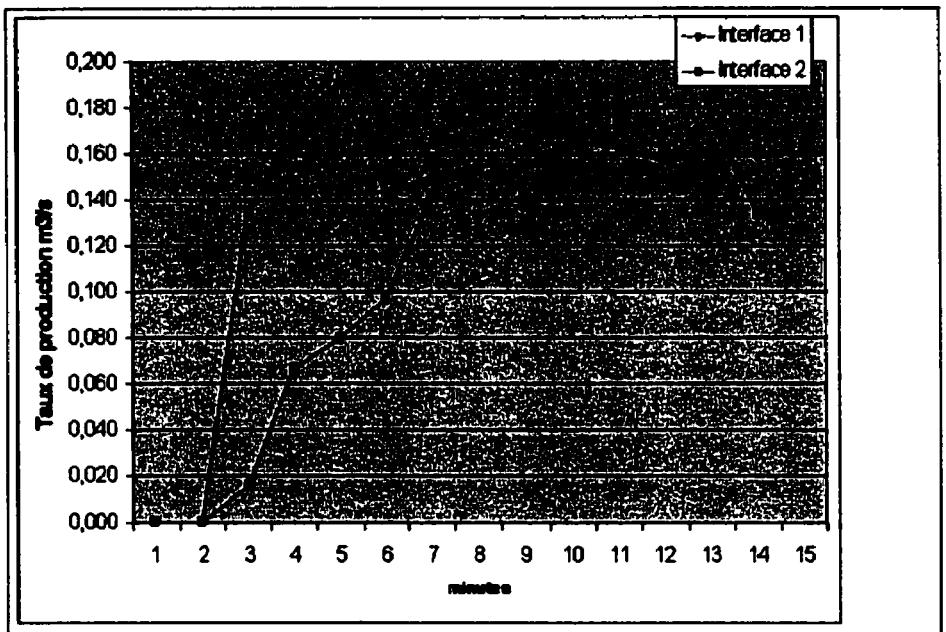


Essais	1	2	3	4	Total session 1	5	6	7	8	Total session 2
Production moyenne (IHM 1)	15,3	36,0	57,9	80,6	189,8	93,8	94,0	105,7	105,6	399,1
Production moyenne (IHM 2)	1,4	16,9	50,5	75,6	144,4	75,6	81,6	84,7	85,4	327,3
Écart entre les moyennes	13,9	19,1	7,4	5,0	45,4	18,2	12,4	21,0	20,2	71,8
Résultats de l'analyse Manova	**Il y a un effet significatif de la session ($p < 0,0001$).** **Il n'y a pas d'effet significatif de l'IHM ($p < 0,1736$).** **Il n'y a pas d'effet significatif de l'interaction session – IHM ($p < 0,4577$).**									

L'effet significatif de la session indique qu'un apprentissage a lieu, comme le montre le graphique. Par ailleurs, il n'y a pas d'effet significatif de l'IHM quant à la production totale, même si l'IHM 1 semble apparaître constamment supérieure à l'IHM 2. On peut vraisemblablement attribuer le fait que ce résultat ne soit pas significatif à la très grande variabilité des résultats individuels, telle que montrée au Tableau 5-4. De plus, un examen plus approfondi des données semble indiquer une différence entre les stratégies utilisées par les deux groupes de sujets. En effet, le tableau suivant montre le taux de production moyen en m^3/s (plutôt que la production totale) atteint par les sujets de

chaque groupe lors de leur dernier essai. On a pris une mesure instantanée à la fin de chacune des 15 minutes qu'a duré l'essai. On a choisi d'analyser cet essai, car c'est celui où les opérateurs maîtrisent vraisemblablement le mieux le système.

Tableau 5-7: Taux de production moyen, interfaces 1 et 2.



Minute	Débit moyen, m^3/s, IHM 1	Débit moyen, m^3/s, IHM 2
1	0,000	0,000
2	0,000	0,000
3	0,133	0,016
4	0,172	0,067
5	0,192	0,080
6	0,143	0,097
7	0,150	0,142
8	0,155	0,134
9	0,155	0,142
10	0,167	0,164
11	0,163	0,173
12	0,158	0,163
13	0,160	0,175
14	0,159	0,133
15	0,160	0,165

L'examen du graphique et des données indique que les sujets exploitant l'IHM 1 débutent la production plus rapidement (vers la minute 3 ou 4) et utilisent une stratégie plus agressive en liquidant très tôt une partie de l'inventaire de produit fini dans le réservoir C, ce qui entraîne une baisse du niveau dans ce dernier.

À l'inverse, les sujets exploitant l'IHM 2 débutent la production de façon plus lente (vers la minute 7) et maintiennent le niveau moyen du réservoir C plus près de sa valeur cible. L'examen des taux de production montre aussi que les sujets utilisant l'IHM 2 ont rattrapé les autres à partir de la dixième minute de production.

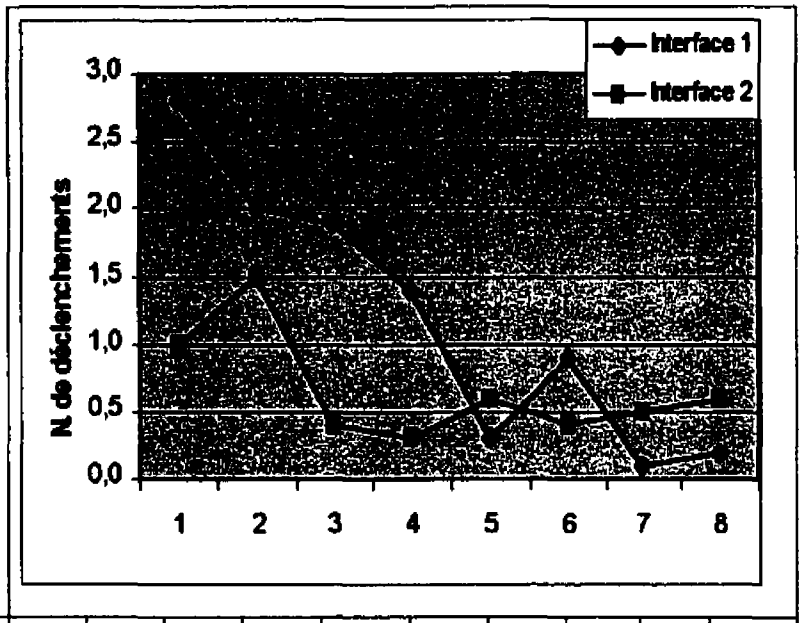
Bien que les résultats de l'analyse statistique n'aient pas atteint le seuil de signification requis, il est possible que ce changement de stratégie soit induit par le type d'interface. Si tel est le cas, on peut relever un désavantage potentiel pour l'IHM 2, car son exploitation semble induire un déficit de production par rapport à une interface traditionnelle. Avant de tirer une telle conclusion, il faut toutefois considérer que:

- Selon les données du tableau et du graphique précédents, le délai de mise en production pour le groupe exploitant l'IHM 2 par rapport à l'autre groupe équivaut à environ 2 minutes de production (soit (20,2 m^3 / (0,166 m^3 /s * 60 s / min))). Cela correspond à 0,14% d'une journée de travail comptant 1440 minutes, toute autre chose étant égale par ailleurs.
- De plus, la performance des sujets exploitant l'IHM 2 pour des tâches de transition est modulée par la procédure qui leur est fournie pour effectuer des tâches de transition. Cette procédure peut vraisemblablement être optimisée pour réduire, sinon éliminer, ce délai.

5.3.3 Sûreté

Le tableau suivant montre le nombre moyen de déclenchements de chaque groupe, pour chacun des essais, ainsi que les résultats de l'analyse Manova.

Tableau 5-8: Nombre de déclenchements des systèmes de sûreté, interfaces 1 et 2.



Essais	1	2	3	4	Total session 1	5	6	7	8	Total session 2
Nombre moyen de déclenchements (IHM 1)	2,8	2,0	1,9	1,4	8,1	0,3	0,9	0,1	0,2	1,5
Nombre moyen de déclenchements (IHM 2)	1,0	1,5	0,4	0,3	3,2	0,6	0,4	0,5	0,6	2,1
Écart entre les moyennes	1,8	0,5	1,5	1,1	4,9	-0,3	0,5	-0,4	-0,4	- 0,6
Résultats, analyse Manova	Il y a un effet significatif de la session ($p < 0,0410$). Il n'y a pas d'effet significatif de l'IHM ($p < 0,2970$). Il n'y a pas d'effet significatif de l'interaction session - IHM ($p < 0,1333$).									

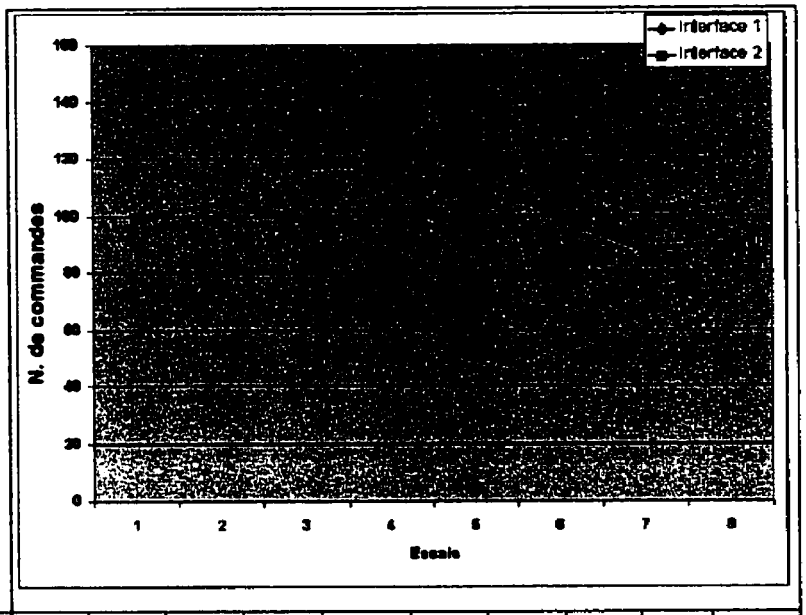
Ici encore, on constate que la session a un effet significatif sur le nombre de déclenchements pour les deux groupes de sujets; après quelques essais, ces derniers apprennent à maîtriser le système de façon à ne plus subir l'action des systèmes de

sûreté. Il n'y a pas de différence significative due à l'IHM pour l'ensemble des sessions. Toutefois, on remarque que les sujets utilisant l'IHM 2 semblent subir moins de déclenchements que ceux utilisant l'IHM 1 durant la première session. Par ailleurs, l'interaction IHM * Session n'atteint pas le seuil de signification requis bien que la valeur obtenue n'en soit pas très éloignée ($p < 0,13$). Il est alors vraisemblable, à cause de la grande variabilité dans les données, qu'un plus grand nombre de sujets aurait permis de faire ressortir soit un effet de l'IHM, ou une interaction entre l'IHM et la session, comme semble le suggérer la figure.

5.3.4 Stabilité

Le tableau suivant montre le nombre d'actions de commandes pour chaque groupe.

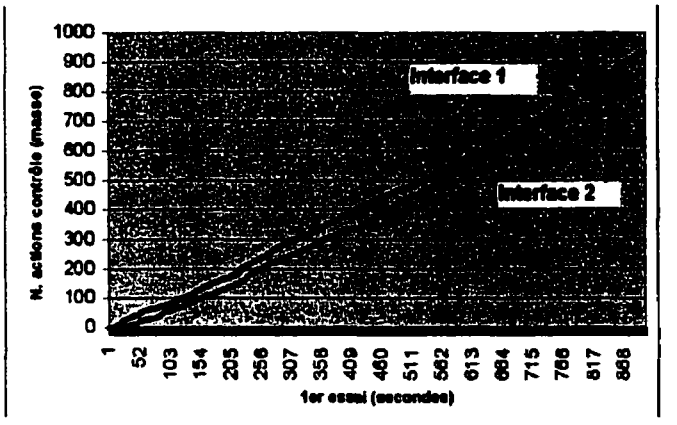
Tableau 5-9: Nombre d'actions de commande, interfaces 1 et 2.



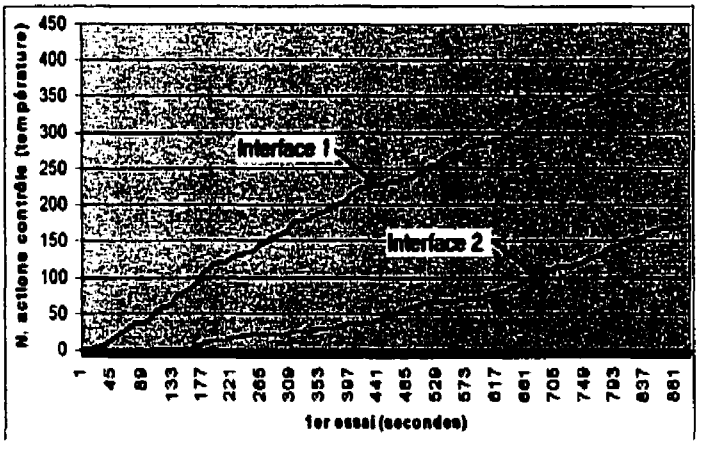
Essai	1	2	3	4	Total session 1	5	6	7	8	Total session 2
Nombre d'actions de commande (IHM 1)	134	142	128	123	526	118	110	102	106	436
Nombre d'actions de commande (IHM 2)	99	104	98	98	399	114	100	88	90	391
Écart entre les moyennes	34	37	30	25	127	4	11	14	16	45
Résultats de l'analyse Manova	Il y a un effet significatif de la session ($p < 0,0400$). Il y a un effet significatif de l'IHM ($p < 0,0223$). Il n'y a pas d'effet significatif de l'interaction session - IHM ($p < 0,0841$).									

L'ensemble des sujets utilise moins de commandes au fur et à mesure de la progression des essais. Les sujets exploitant l'IHM 2 ont aussi de meilleurs résultats tout au long des essais et leur performance de départ (essais 1, sur le graphique) est supérieure à celle des sujets exploitant l'IHM 1 après les 8 essais. Comme il s'agit du premier facteur où une différence significative due à l'IHM a été démontrée, on a analysé de façon plus fine ces résultats pour déterminer d'où provenaient les différences. On a donc examiné le premier et le dernier essai, ce qui a aussi permis d'évaluer la stabilité

dans une situation nouvelle et d'évaluer l'influence de l'interface après que les sujets soient plus expérimentés. Les figures suivantes montrent le nombre total de commandes sur les vannes et sur les chauffe-eau, lors du premier essai, pour chacun des groupes de sujets.



(a) – Masse

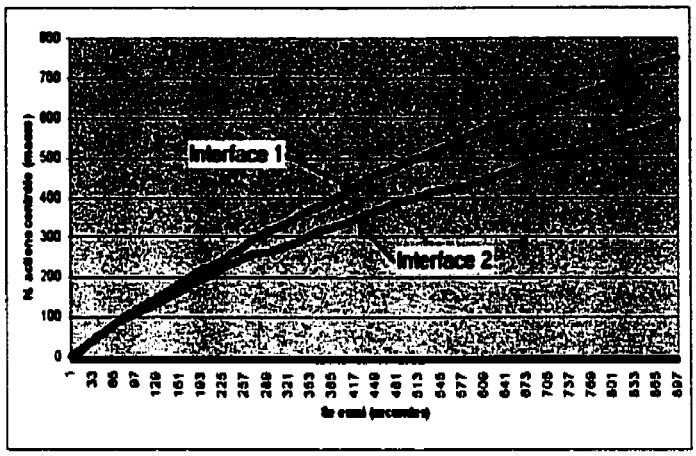


(b) – Température

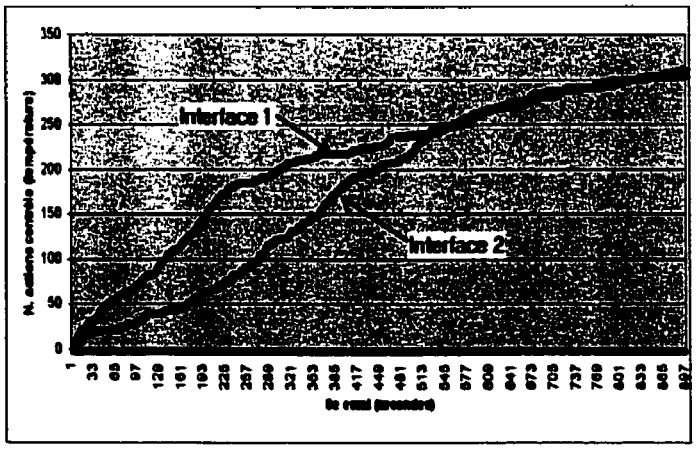
Figure 5-3: Nombre d'actions de contrôle, premier essai.

On constate à la partie (a) de la figure qu'il y a peu de différences entre les nombres de commandes au début de l'essai, mais qu'une divergence apparaît vers la 700e seconde de l'essai et qu'elle croît par la suite. Il y a aussi beaucoup moins de commandes pour la température pour l'IHM 2, comme montré à la partie (b) de la figure. Toutefois, on ne peut y voir à ce point un avantage pour l'IHM 2, car le nombre plus élevé d'actions de

contrôle pour l'IHM 1 pourrait ne traduire que la productivité accrue atteinte par ces sujets lors du premier essai. L'avantage apparent de l'IHM 2 pourrait n'être dû qu'à ce que la procédure fait intervenir l'atteinte des consignes de température après que les questions d'écoulement de la masse aient été réglées. Pour clarifier ceci, on a réalisé la même analyse pour le dernier essai. La figure suivante montre les résultats obtenus.



(a) Masse



(b) Température

Figure 5-4: Nombre d'actions de contrôle, dernier essai.

La figure montre que, même après plusieurs essais, la divergence du nombre de commandes requises pour l'écoulement de la masse entre les sujets exploitant les IHM 1

et 2 atteint plus de 20 % en faveur de l'IHM 2, et que cette divergence semble s'accentuer.

On peut tenter d'expliquer cet écart de plusieurs façons. D'une part, il est possible que les sujets de l'IHM 2 utilisent la stratégie qui leur a été présentée et règlent d'abord la proportion et les niveaux, donc l'écoulement de la masse, et se concentrent ensuite sur le contrôle de température. À l'inverse, on peut penser que les sujets de l'IHM 1 tentent de régler simultanément l'écoulement de la masse et la température comme le suggère l'examen de la partie (b) de la figure; ces réglages simultanés étant plus difficiles que des réglages successifs, cette stratégie pourrait expliquer la différence du nombre de commandes utilisées par les sujets exploitant l'IHM 1. Toutefois, le fait que les sujets exploitant l'IHM 1 continuent d'utiliser plus de commandes que ce qui est requis une fois les consignes de proportion et de température atteintes (vers la fin de l'essai) semble démentir cette hypothèse.

Il peut toutefois y avoir une meilleure explication. En effet, l'observation des sujets suggère qu'une des tâches les plus difficiles, même après plusieurs essais, est de déterminer l'effet sur la proportion d'un changement du débit des réservoirs A et B (par exemple, si le débit de B ↑, la proportion ↓, alors que si le débit de B↓, la proportion ↑). Dans l'IHM 2, on a prévu un dispositif montrant de façon explicite la causalité entre les dispositifs de contrôle et le sens dans lequel les variables pertinentes seront affectées (voir section 5.2.3). Lors des essais de l'IHM 2, on a recueilli les commentaires de plusieurs sujets qui ont indiqué qu'ils utilisaient ce dispositif soit de façon exclusive (« je ne tente même pas de raisonner, mais j'utilise la flèche automatiquement ») ou pour confirmer leur choix. Il est donc possible que ce dispositif ait permis de réduire, du moins pour quelques cas, le nombre d'actions de contrôle requis. Pour tenter de vérifier cette hypothèse, on a mesuré le nombre d'actions de contrôle par type de dispositif lors du dernier essai; le tableau suivant montre les résultats.

Tableau 5-10: Nombre de commandes par dispositif, dernier essai.

	Vanne entrée, A	Vanne sortie, A	Vanne entrée, B	Vanne sortie, B	Vanne sortie, C	Vanne rejets,
Nombre de commandes, IHM 1	47	302	90	195	99	18
Nombre de commandes, IHM 2	47	140	83	151	122	54
Différence entre le nombre de commandes, interfaces 1 et 2	0	162	7	44	-23	-36
Différence entre le nombre de commandes, en %, interfaces 1 et 2	0 %	116 %	8 %	29 %	-19 %	-67 %

Les résultats pour les vannes de sortie A et B montrent que les sujets utilisant l'IHM 1 ont utilisé beaucoup plus de commandes que ceux exploitant l'IHM 2 pour régler ces dispositifs. Comme les vannes de sortie des réservoirs A et B ont, à court terme, une influence déterminante sur la proportion dans le réservoir C, on peut supposer que l'assistance fournie pour leur réglage a contribué à réduire le nombre d'ajustements requis. De plus, et comme on le verra à la section 5.3.6, les sujets exploitant l'IHM 1 tendent à conserver des niveaux plus bas dans les réservoirs; ceci place le système dans une situation potentiellement moins stable et peut requérir plus d'actions pour en rétablir ou en maintenir l'équilibre.

On constate qu'il n'y a pas de différence notable entre le nombre d'actions requis pour le contrôle de la température à la fin de l'essai. De fait, il semble vraisemblable que la différence observée dans la première partie de l'essai soit attribuable au fait que les

sujets utilisent la stratégie qui leur a été présentée dans l'IHM 2, soit régler d'abord la proportion et les niveaux, et régler ensuite la température.

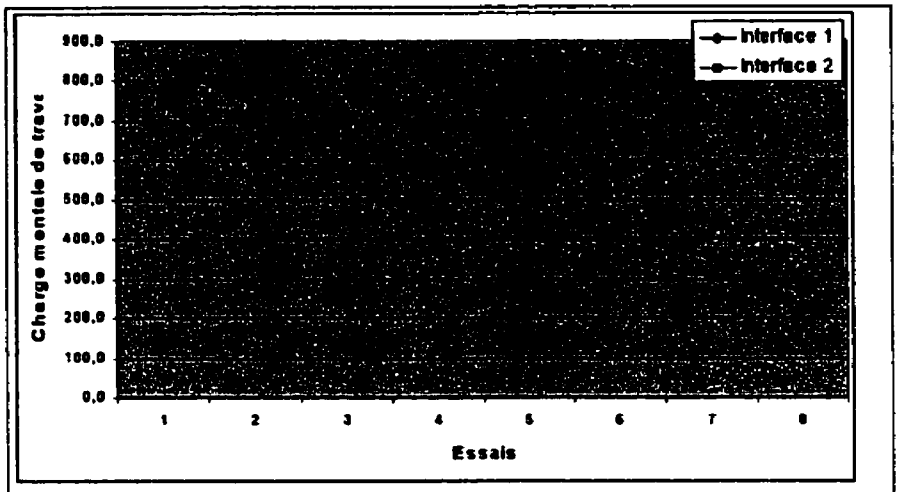
Enfin, même si la stabilité du processus est un critère important, il existe d'autres raisons pour minimiser le nombre de commandes utilisées pour atteindre et maintenir les consignes:

- Dans plusieurs processus, les mécanismes (p.ex., vannes, moteurs) utilisés pour agir sur le processus sont sujets à l'usure ou à la détérioration; il importe donc de ne pas les utiliser inutilement.
- Le besoin d'utiliser plusieurs commandes pour maintenir l'atteinte des objectifs requiert que l'opérateur se concentre sur cet aspect de sa tâche. Ceci est relativement aisé pour un essai de 15 minutes sur un processus de petite envergure, mais peut devenir problématique lors d'un quart complet de travail sur un processus en vraie grandeur.

5.3.5 Charge de travail

À la fin de chaque essai, on a mesuré la charge mentale de travail du sujet. On a recueilli cette évaluation pour chaque sujet, à la fin de chaque essai de 15 minutes; le système informatisé gérant le déroulement de l'essai présentait un formulaire électronique comportant une glissière à l'utilisateur et on demandait à ce dernier d'indiquer sa charge mentale de travail sur une glissière graduée de « Très faible (1) » à « Très élevée (10) ». De façon interne au logiciel, ce résultat était ramené de 1 à 1000. Le tableau suivant montre les moyennes de chaque groupe pour chaque essai, et la valeur résultante (sommation) pour chaque session.

Tableau 5-11: Charge mentale de travail, situations normales.



Essai	1	2	3	4	Total session 1	5	6	7	8	Total session 2
Moyenne (IHM 1)	851,1	741,4	618,3	577,9	2788,7	457,3	408,6	354,7	267,8	1488,4
Moyenne (IHM 2)	744,5	595,0	556,1	395,8	2291,4	408,0	345,5	307,4	288,1	1349
Écart entre les moyennes	106,6	146,5	62,2	182,1	497,4	49,3	63,1	47,3	-20,3	139,4
Signification des écarts	Il y a un effet significatif de la session ($p < 0,0001$). Il n'y a pas d'effet significatif de l'IHM ($p < 0,3859$). Il n'y a pas d'effet significatif de l'interaction session - IHM ($p < 0,2751$)									

On constate un effet significatif de la session; toutefois, il n'y a pas d'effet significatif de l'IHM, ni d'interaction significative entre l'IHM et la session. Ici aussi, la forte variabilité des données couplée avec le fait que la charge mentale de travail ressentie par les sujets exploitant l'IHM 2 soit systématiquement inférieure à celle des sujets exploitant l'IHM 1 suggère que des effectifs plus nombreux pourraient permettre de faire ressortir une différence entre les groupes.

5.3.6 Autres résultats

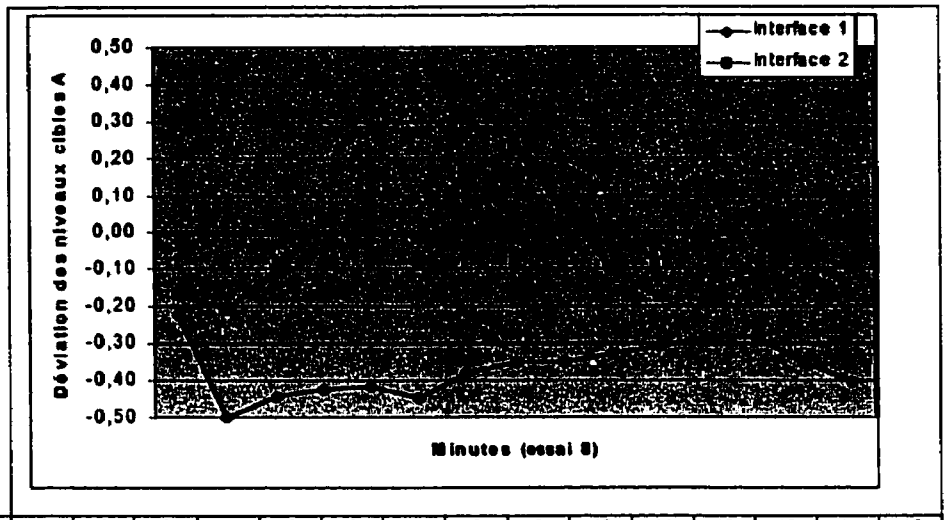
On a aussi recueilli plusieurs informations, souvent qualitatives, et qui sont susceptibles de compléter certains des résultats obtenus jusqu'ici. Ces informations ont été obtenues à partir d'observations réalisées lors des différents essais et des verbalisations des sujets pendant ou après ces essais. Les observations communes aux deux groupes de sujets sont:

- Presque tous les sujets attachent une grande importance, du moins au début, aux indications sur le % d'ouverture des vannes plutôt qu'au débit de ces vannes. Vers la fin des essais, la plupart des sujets utilisent les débits pour équilibrer l'écoulement de la masse dans le système, mais certains continuent de croire que l'ouverture des vannes est linéairement proportionnelle au débit.

- Plusieurs sujets ont évoqué un lien hypothétique entre le niveau dans un ou des réservoirs et le taux de production du processus. Par exemple, certains sujets croyaient qu'il est préférable de maintenir le niveau du réservoir correspondant au maximum du produit utilisé dans le mélange (p. ex., le niveau de B pour une cible de proportion de 35 %) le plus bas possible pour maximiser la production. Cette conclusion est erronée et indique que même si les interfaces peuvent communiquer des connaissances sur les systèmes, tous les sujets ne développeront pas un modèle adéquat du processus.

- De façon globale, les sujets utilisant l'IHM 2 ont maintenu des niveaux plus près de la valeur demandée (2 m) que ceux utilisant l'IHM 1. Le tableau suivant montre l'écart total, en mètres, entre les niveaux mesurés et la valeur demandée pour les réservoirs A et B, à la fin de chacune des minutes de l'essai 8 pour chacun des groupes de sujets.

Tableau 5-12: Écart entre les niveaux des réservoirs A et B et la valeur demandée, 8e essai.

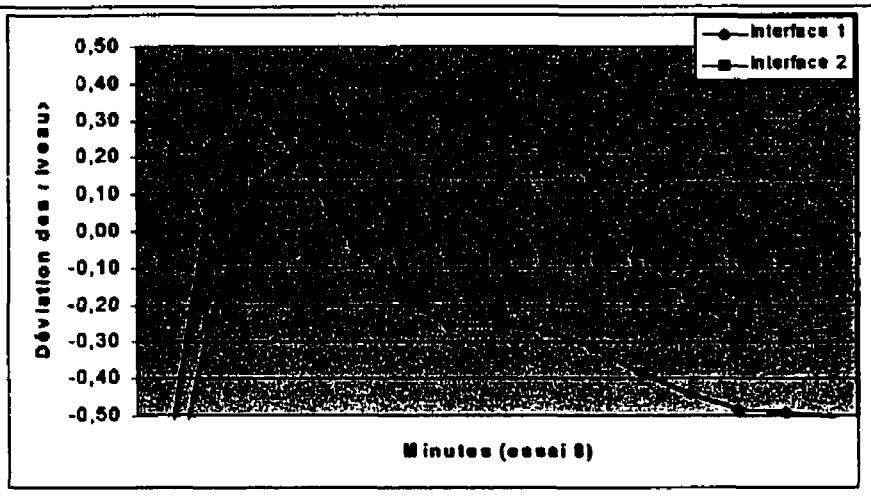


Minute	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IHM 1, écart, m	-0,2	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4
IHM 2, écart, m	-0,2	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1

Il faut noter qu'au début de chaque essai, les niveaux des réservoirs A et B sont initialisés à 2 m; les écarts subséquents sont donc reliés, pour l'essentiel, à la stratégie de commande utilisée par les sujets.

Dans le cas du réservoir C, le niveau de celui-ci est de 0 m au tout début de chaque essai; le réservoir se remplit graduellement, car les vannes l'alimentant y déversent environ 0,1 m^3 de liquide à chaque seconde. Le tableau suivant montre l'écart entre le niveau demandé et le niveau mesuré à la fin de chacune des minutes de l'essai 8, pour chacun des groupes de sujets.

Tableau 5-13: Écart entre les niveaux du réservoir C et la valeur demandée, 8e essai.



Minute	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IHM 1, écart, m	-0,7	0,1	0,4	0,2	0,0	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5
IHM 2, écart, m	-0,8	-0,3	0,1	0,2	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3

Les sujets exploitant l'IHM 1 ont gardé un niveau dans le réservoir C qui tend à s'éloigner de la valeur demandée (2 m) vers la fin de l'essai; les sujets utilisant l'IHM 2 ont maintenu un écart moins grand, et ce dernier a même tendu à diminuer. On peut probablement attribuer cette différence au fait que la procédure intégrée à l'IHM 2 comportait des étapes relatives à l'atteinte et au maintien de niveaux moyens d'environ 2 m dans les réservoirs (les mêmes consignes étaient aussi communiquées verbalement aux sujets des deux groupes au début de chaque séance d'essais). La stratégie consistant à maintenir des niveaux peu élevés présente des lacunes importantes. D'abord, elle rend le système plus instable pour le maintien des objectifs de température et de proportion. En effet, un niveau peu élevé dans les réservoirs A, B ou C réduit le temps requis pour changer la température dans le réservoir; le système réagit donc alors de façon beaucoup plus rapide et laisse moins

le temps au sujet de corriger le tir, le cas échéant. Le même phénomène se produit dans le cas de la proportion du réservoir C suite à des changements dans les débits des réservoirs A ou B. De plus, un niveau divergent de façon appréciable de 2 m dans chaque réservoir rend le système plus vulnérable aux pannes. Par exemple, si le niveau d'un réservoir est de 2 m et qu'une panne de la vanne d'alimentation de ce réservoir interrompt le débit d'entrée, la production pourra être poursuivie plus longtemps que si le niveau n'avait été que de 1,25 m.

- Les graphiques de tendances fournis aux sujets des deux groupes n'ont presque pas été utilisés selon les réponses des sujets aux questions de l'observateur, en dépit du fait que ce type de graphique constitue normalement un outil très important pour la conduite de systèmes complexes (Alengry, 1989). On peut avancer diverses explications à ceci, dont celle, fournie par quelques sujets, à l'effet que la taille de ces graphiques ne permettait pas de discerner l'évolution des variables. De plus, il semble que la charge de travail très élevée, du moins durant les premiers essais, n'ait pas laissé beaucoup de latitude aux sujets pour explorer comment tirer partie de l'IHM pour optimiser leur tâche. Enfin, il est possible que les informations fournies ailleurs sur l'IHM (valeurs numériques et alarmes) aient été suffisantes pour la tâche.

- Des sujets ont proposé une solution qui pourrait améliorer, facilement et avec peu d'efforts, les tâches de réglage de la température et de la proportion. Cette amélioration consiste à rendre disponible une trace des réglages utilisés lors de manoeuvres précédentes pour aider les sujets à estimer, même grossièrement, les réglages pour les essais subséquents. Cette idée recèle encore plus de potentiel si on envisage de collecter de façon continue les valeurs des variables manipulées et contrôlées, et d'obtenir ainsi des estimés des gains approximatifs entre ces variables; ceux-ci pourraient être affichés sous forme graphique, pour en montrer les régions linéaires et non-linéaires.

Des observations supplémentaires ont aussi été réalisées pour les sujets utilisant l'IHM 1:

- Plusieurs sujets ont manifesté une inhibition sur l'utilisation de la vanne d'évacuation à l'égout, en dépit du fait qu'aucune restriction à l'emploi de ce dispositif n'ait été imposée.
- On a constaté que plusieurs sujets oubliaient soit de mettre en marche l'agitateur ou de fermer la vanne de sortie à l'égout lors des divers essais; dans ce dernier cas, une erreur fréquente consistait à acheminer le produit fini vers le circuit de production et à ensuite surveiller l'évolution du processus, tout en laissant une partie de la production s'écouler vers l'égout. Cette lacune n'a été observée que rarement pour les sujets utilisant l'IHM 2, vraisemblablement à cause de l'utilisation de la procédure.
- Plusieurs sujets ont éprouvé des difficultés à régler les débits des réservoirs A et B pour atteindre les cibles de proportion dans le réservoir C, même lors du dernier essai. Comme on l'a expliqué à la section 5.3.4, ce réglage requiert un raisonnement faisant intervenir diverses variables et a pu être ardu pour quelques-uns des sujets.
- Plusieurs sujets ont tenté de régler les vannes ou les chauffe-eau à des valeurs inférieures ou supérieures à leur plage admissible (p. ex., < 0 % ou > 100 % pour l'ouverture des vannes, ou < 0 Watts ou > 10 000 Watts pour les chauffe-eau). Les sujets ont semblé examiner le résultat de leurs actions sur la variable manipulée sans tenir compte de la variable contrôlée.

Dans le cas des sujets utilisant l'IHM 2, on a observé que:

- La plupart des sujets ont suivi la procédure fournie lors de leurs premiers essais. Toutefois, la plupart, sinon l'ensemble, des sujets ont aussi manifesté le besoin d'améliorer cette dernière après qu'ils aient eu complété quelques essais avec succès (en général, 3 à 4 essais). L'amélioration la plus fréquente a consisté à effectuer très tôt un réglage grossier de la température et d'ensuite régler la proportion. Cela permettait aux sujets de gagner du temps à partir du moment où ils pouvaient formuler une estimation de l'effet des réglages des chauffe-eau sur la température dans le réservoir C.

- Quelques sujets ont décidé soit de ne pas utiliser la procédure, soit d'en dévier avant d'avoir acquis une maîtrise adéquate du processus. En général, cela s'est traduit par un plus grand nombre de déclenchements des systèmes de sûreté. En fait, ces sujets étaient doublement pénalisés, car non seulement ils n'utilisaient pas, ou plus, la procédure, mais ils n'avaient pas développé les habiletés de conduite non assistée dont avaient bénéficié les sujets utilisant l'IHM 1. L'observateur a alors encouragé ces quelques sujets, après 1 ou 2 essais, à suivre la procédure jusqu'à ce qu'ils jugent leur maîtrise du processus suffisante.
- On remarque que les sujets du groupe utilisant l'IHM 2 ont suivi un « plan de match » qui était dans une certaine mesure prévisible, car guidé, pour la plupart des cas, par la procédure de conduite. Ceci permet d'envisager une amélioration continue, à partir des données empiriques provenant des traces d'exécution de la procédure, du soutien fourni par l'interface (incluant la procédure elle-même) à l'exécution de certaines tâches.
- À partir de ces informations, il serait maintenant possible de tenter d'améliorer sélectivement cette partie de l'IHM pour la tâche d'atteinte et de maintien des niveaux et de la proportion ainsi que de mesurer le succès de cette intervention.

5.4 Synthèse – situations normales

On présente ici une synthèse des résultats des sections précédentes et on voit si les objectifs visés par cette validation (voir la section 5.1) ont été atteints. Ainsi, on a évalué la performance des sujets pour:

- L'atteinte des objectifs de production; bien qu'il n'y ait pas de différences significatives entre les productions totales des deux groupes de sujets, celle des sujets exploitant l'IHM 1 a été supérieure à celle du groupe exploitant l'IHM 2. Cependant, cette différence est, sur un horizon de quelques heures, minime. De plus, on peut penser qu'une optimisation de la procédure de conduite permettrait de réduire, sinon

d'éliminer, cet écart.

- Le maintien des conditions de sûreté du processus; il n'y a pas eu de différence significative entre le nombre de déclenchements subis par chacun des groupes de sujets.
- Le maintien du processus dans un état stable; ici, les sujets exploitant l'IHM 2 ont eu une performance significativement supérieure à celle de ceux exploitant l'IHM 1.
- Le maintien d'une charge de travail acceptable pour les opérateurs; il n'y a pas eu de différence atteignant le seuil de signification retenu.

On note aussi qu'à cause de la grande variabilité des données et du fait que des différences constantes entre les moyennes des groupes étaient présentes pour la production totale et la charge de travail, il est possible que des effectifs plus importants auraient permis de mettre en lumière une différence significative entre les groupes. Cela pourrait aussi être le cas pour le nombre de déclenchements, quoique la tendance soit moins claire pour cette variable.

CHAPITRE 6: VALIDATION DE LA MÉTHODE TAGCI - SITUATIONS ANORMALES

Alors que le chapitre précédent traitait des situations normales, on présente ici les résultats de la validation de la méthode dans le cas où des incidents ou anomalies[20] sont susceptibles de se produire. Bien que le soutien de la tâche de l'opérateur lors de la conduite en situations normales soit très important (en général, c'est le type de situations qui prévaut), il est aussi indispensable que l'interface offre un soutien adéquat lors d'incidents ou d'accidents. En effet, une interface qui ne permettrait pas d'identifier et de gérer ces cas permettrait difficilement d'éviter que la situation ne dégénère et serait donc inacceptable.

Deux types de validations ont eu lieu. Une validation de Tagci a eu lieu en laboratoire en se servant du même processus expérimental que celui utilisé pour les situations normales; cette validation visait à mesurer la performance de sujets exploitant une interface Tagci dans ces situations. Une autre validation a permis de démontrer que les principes proposés par Tagci pouvaient être utilisés pour concevoir une IHM destinée à un processus de très grande envergure, soit une centrale nucléaire.

6.1 Validation expérimentale de Tagci pour les situations incidentelles

Cette section présente la démarche utilisée et les résultats obtenus lors de la validation expérimentale de la méthode Tagci pour la conception d'IHM destinées à la conduite en situation incidentelle.

---

[20] On entend ici par « anomalies » des défaillances de matériel (vanne ou chauffe-eau qui cesse de fonctionner, fuite dans un réservoir ou une canalisation, etc.).

6.1.1 Objectifs

La validation de Tagci, pour ce type de situations, vise à tester l'hypothèse selon laquelle une interface élaborée avec cette méthode est globalement supérieure, sinon égale, à une interface conventionnelle par rapport à l'atteinte des objectifs suivants:

- détection d'anomalies et identification de la cause,
- maintien des conditions de sûreté du processus,
- stabilisation du processus et poursuite de la production,
- maintien d'une charge de travail acceptable pour les opérateurs.

6.1.2 Méthodologie

Cette section décrit la méthodologie utilisée pour réaliser la validation expérimentale. On identifie le processus expérimental qui a été utilisé et on explique les tâches pour lesquelles les interfaces ont été comparées. On décrit alors les éléments pertinents de ces interfaces et on discute aussi des caractéristiques des sujets. On décrit ensuite les critères d'évaluation, le design expérimental et la procédure qui ont été utilisés. Enfin, on présente et on commente les résultats qui ont été obtenus.

6.1.2.1 Processus

On a utilisé le même processus expérimental que celui décrit à la section 5.2.1, sauf pour l'ajout de pannes qui étaient déclenchées à des moments spécifiés lors de l'exécution de la simulation par le programme informatique. Ces pannes sont décrites en détails à la section 6.1.2.5.

6.1.2.2 Tâches

Les sujets devaient effectuer les mêmes tâches (détection, transition pour les cas prévus et optimisation) que celles décrites à la section 5.2.2, avec en plus les tâches suivantes:

- Une tâche de compensation, où le sujet devait d'abord identifier la présence d'une menace à un des buts d'opération, élaborer un plan permettant d'y faire face au moyen des éléments de l'interface et implanter ce plan. On rappelle qu'on a déjà testé l'IHM 2 quand une procédure était fournie pour soutenir une tâche prévue (la transition) et on a déjà expliqué la similitude entre une tâche de transition et une tâche de compensation (voir la section 3.2). On dispose donc de résultats pour les cas de transition prévus, et ces résultats sont vraisemblablement aussi utilisables pour les cas de compensation pour des situations prévues. On a donc choisi de tester ici l'IHM 2 dans un cas de compensation imprévue pour voir si elle permettrait aux sujets d'effectuer leur tâche de façon satisfaisante dans ce type de situations. On compte aussi qu'il sera vraisemblable d'en exploiter les résultats pour les cas de transition imprévus.

- Une tâche de diagnostic telle que définie à la section 3.3.4[21], quoiqu'en certains cas cette tâche ne soit pas toujours nécessaire pour tous les sujets, entre autres à cause de la simplicité des pannes et du processus. Par exemple, si un sujet manipule le panneau de commande des chauffe-eau et qu'une panne affecte ces derniers (comme c'est le cas pour une des pannes décrites à la section 6.1.2.5), seule la détection de la menace au but du maintien du chauffage sera requise pour déclencher l'élaboration d'une compensation.

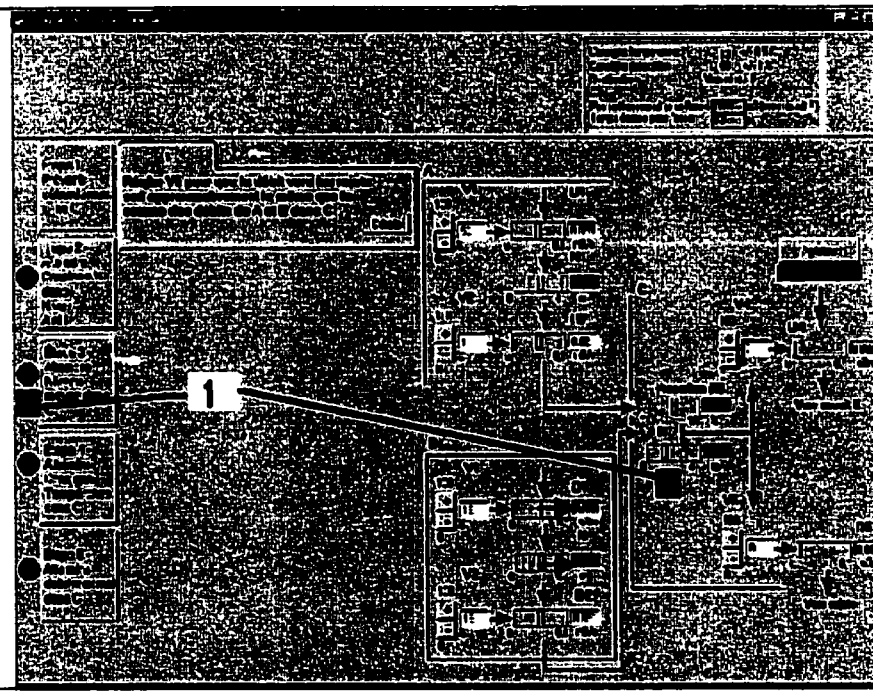
---

[21] Rappel: « ... application de la tâche de détection d'une menace à un but à partir d'un niveau donné dans le modèle fonctionnel et ensuite récursivement à chacun des niveaux inférieurs ». L'application récursive s'arrête quand un plan approprié (ou, de façon équivalente, une compensation) a été identifié, le cas échéant, ou lorsque la fonction à la source de la défaillance a été identifiée même si aucun plan approprié n'existe pour rétablir la situation ».

6.1.2.3 Interfaces comparées

On a utilisé les mêmes interfaces que pour l'expérimentation en situations normales (voir la description à la section 5.2.3), sauf pour des informations qui ont été ajoutées à l'IHM 2; en effet, celle-ci permet d'indiquer explicitement à l'opérateur l'existence d'une menace éventuelle à l'atteinte d'un des buts. Le tableau suivant décrit comment ces informations additionnelles sont fournies aux sujets.

Tableau 6-1: IHM 2 en situation de panne.



- La colonne de gauche de l'image correspond aux objectifs (ou buts) de la conduite. Une menace à un de ces buts est indiquée par un témoin orange (élément 1) apparaissant à proximité du but menacé; de plus, pour faciliter le repérage de l'opérateur, un autre témoin orange apparaît sur l'image de commande correspondante, à proximité de l'indication numérique ou graphique du but.
- Le carré orange ne signale que la présence d'une menace envers un des buts; il ne fournit aucune indication sur l'anomalie matérielle en cause.

Comme on l'a indiqué à la section 4.1, si une tâche de compensation est requise et qu'une procédure appropriée n'est pas disponible, comme dans le cas de l'IHM 2, les sujets doivent utiliser les informations mises à leur disposition pour élaborer eux-mêmes un plan et continuer de détecter la présence de menaces aux buts d'opération.

6.1.2.4 Sujets

Les sujets avaient tous participé à la validation expérimentale lors de situations normales et utilisaient la même interface que celle qu'ils avaient exploitée lors de cette première validation.

Par ailleurs, une vérification des fichiers informatiques ayant servi à séquencer les essais a été effectuée à la fin de la validation expérimentale; cette vérification a révélé que certains des fichiers de données recueillis pour des sujets ayant utilisé l'IHM 2 n'étaient pas utilisables. En effet, pour certains sujets, les consignes (température, proportion) communiquées par l'IHM ont différé de celles normalement prévues pour les essais comportant des pannes et ceci aurait pu avoir une conséquence sur les résultats obtenus. Ce problème a été découvert alors que la série d'essais en situations incidentelles était terminée et que le groupe d'élèves d'où avaient été tirés les sujets avait complété la session académique; il n'était donc pas possible de les remplacer avant plusieurs mois. De plus, tout remplaçant éventuel aurait dû effectuer toute la batterie d'essais en situations normales avant d'effectuer les essais en situations anormales. On a donc choisi de corriger la situation comme suit: les résultats des 10 sujets ayant utilisé l'IHM 1 ont été utilisés, mais seuls les résultats obtenus lors d'essais complétés avec des consignes équivalentes pour les sujets ayant exploité l'IHM 2 ont été utilisés. Cette décision a été prise avant l'analyse des données, et les résultats utilisés pour le second groupe n'ont été retenus que sur la base de leur disponibilité et avant d'examiner les résultats obtenus par les sujets. Le nombre de sujets retenus sera indiqué pour chacun des résultats qui seront présentés dans les sections subséquentes.

6.1.2.5 Critères d'évaluation et design expérimental

On a utilisé les critères suivants pour mesurer l'atteinte de chacun des objectifs:

- Le maintien des conditions de sûreté du processus, en mesurant le nombre de déclenchements des systèmes de sûreté assurant que le niveau dans chacun des réservoirs ne dépasse pas les limites maximales (pour éviter les débordements des réservoirs) ou minimales (pour éviter les surchauffes de l'équipement), à partir de l'occurrence de la panne, qu'elle ait été détectée ou non. Cette mesure est prise pour chaque type de panne.

- La stabilisation du processus et la poursuite de la production, en mesurant la production totale de produit fini des opérateurs, mesurée en m^3/s, à partir de l'occurrence de la panne. Cette mesure est prise pour la plupart des pannes (on indique l'exception à la section concernée).

- Le maintien d'une charge de travail acceptable pour les opérateurs, en mesurant la charge mentale de travail de ces derniers. On a utilisé, comme pour la validation en situations normales, la méthode d'évaluation globale de la charge mentale de travail.

- La détection d'une anomalie et l'identification de sa cause (donc, la détection d'une menace envers un des buts et le diagnostic de la cause de cette menace). La détection et l'identification de la cause d'une anomalie sont difficiles à évaluer à cause de la multiplicité des résultats possibles (anomalie détectée ou non, identification complète ou partielle de la cause, délai d'identification, etc.). En effet, il faut tenir compte à la fois du résultat global (est-ce que l'anomalie a été détectée?) et d'aspects plus quantitatifs (p. ex., est-ce qu'une interface a favorisé un meilleur diagnostic? Combien de temps a-t-il fallu pour détecter une panne?). Cette problématique suggère une approche basée sur un classement des résultats selon le moment de détection et d'identification de l'anomalie et sur la qualité de cette détection. On a

attribué à chaque résultat, pour un type de panne donné, un rang correspondant à:

- Une valeur égale à 0 plus le nombre de secondes écoulées depuis le moment où la cause de l'anomalie a été correctement identifiée par le sujet (par exemple, 45 si le sujet a détecté correctement l'anomalie après 45 secondes de son occurrence).
- Une valeur égale à 1000 plus le nombre de secondes écoulées depuis le moment où une anomalie a été identifiée par le sujet mais que l'identification de sa cause n'était pas exacte. Ceci permettait de tenir compte de la rapidité des sujets à identifier une anomalie, même si l'identification de sa cause n'était pas exacte.
- Une valeur égale à 2000 si les sujets ne détectaient pas d'anomalie.

Il faut noter que le choix des valeurs de 0, 1000 et 2000 ne visait qu'à définir des intervalles pour ordonnancer les mesures; des valeurs différentes auraient tout aussi bien pu être utilisées (p. ex., 5 000, 10 000 et 15 000) sans changer quoi que ce soit aux résultats de l'analyse. Dans les sections subséquentes, on fournira les rangs obtenus pour la performance de la tâche de détection. De plus, le détail de cette analyse est fourni à l'Annexe D.

Les variables dépendantes sont donc: le nombre de déclenchements, la production totale de produit fini depuis l'occurrence de la panne, la charge mentale de travail, la vitesse de détection et la qualité du diagnostic d'une anomalie; la variable indépendante est le type d'interface. On obtient donc un design expérimental simple où on compare la performance de deux groupes de sujets exploitant chacun un type d'IHM.

À cause du nombre moins élevé de sujets et de la grande variabilité dans les données, on a choisi d'analyser les résultats au moyen d'une méthode d'analyse non-paramétrique qui est relativement indépendante des hypothèses de normalité des données, soit la méthode dite U de Mann-Whitney. Ce type de méthode est très efficace même si les hypothèses

sous-jacentes à une méthode comme Manova ne sont pas satisfaites; il constitue donc une excellente alternative aux tests paramétriques usuels (Ferguson et Takane, 1989). On a conservé un seuil de signification requis de $P \leq 0,05$. Le détail de cette analyse est fourni à l'Annexe D.

6.1.2.6 Procédure expérimentale

L'expérimentation a consisté à faire effectuer par des sujets, de façon individuelle, des essais au cours d'une même session de travail. Cette session a comporté cinq essais, dont chacun avait une durée de 15 minutes. De plus, les sujets étaient informés qu'il était possible qu'une panne (définie comme précédemment) se produise lors d'un ou de plusieurs essai(s), mais qu'il était aussi possible qu'aucune panne ne se produise. Le premier essai ne servait que de réchauffement et ne comportait pas de panne; il contribuait à renforcer la notion qu'il était possible qu'il n'y ait pas de panne durant les essais (les sujets n'étaient pas informés de cette fonction du premier essai). Les quatre essais suivants présentaient chacun un type de panne différent. Comme pour l'expérimentation précédente, les sujets devaient prioritairement atteindre les objectifs suivants:

- atteindre les consignes de proportion et de température qui leurs étaient communiquées,
- atteindre une productivité maximale pour le système.

On leur demandait aussi d'atteindre l'objectif secondaire suivant: maintenir les niveaux dans les réservoirs stables et près de leur valeur mi-niveau (2 m).

Dans l'éventualité où ils détectaient une panne, les sujets devaient en avertir l'observateur immédiatement, stabiliser le processus, informer l'observateur de l'origine de la panne (si celle-ci était immédiatement apparente) et tenter de poursuivre la production. Toutefois, l'identification de l'origine de la panne était un objectif

secondaire à ceux de la stabilisation et à la reprise de la production et pouvait être différée tant que ces objectifs n'avaient pas été atteints. Comme pour les essais en situations normales, on a rappelé à chaque sujet les consignes de proportion et de température à atteindre, et on leur a communiqué les consignes additionnelles à observer dans l'éventualité d'une panne. On a fait ressortir la possibilité qu'il n'y aurait aucune panne, mais que si une panne survenait, elle serait présente pour le reste de l'essai. On a aussi insisté sur le fait que l'identification de l'origine d'une panne éventuelle était subordonnée à la stabilisation du processus et au maintien de la production. On a choisi des pannes qui apparaissaient plausibles dans un contexte de contrôle de processus telles que des bris d'équipement (p. ex., vannes, réservoirs) pour tester les interfaces. De plus, bien que les pannes du même type aient été introduites au même moment des essais correspondants pour chacun des sujets, il est clair que la situation (p. ex., niveaux, températures, débits) dans laquelle on insérait la panne variait entre les sujets, ne serait-ce qu'à cause des stratégies différentes utilisées par ceux-ci. Le tableau suivant décrit ces pannes.

Tableau 6-2: Description des pannes.

Type de panne	Description
Vanne d'alimentation du réservoir B.	• Les caractéristiques de la vanne d'alimentation du réservoir B changent de façon à ne plus laisser que 40 % du débit habituel correspondant à une ouverture de vanne donnée (p. ex., au lieu de laisser passer 0,05 m^3/s à 50 % d'ouverture, le débit n'est plus alors que de 0,02 m^3/s). Les consignes de proportion à atteindre pour les essais utilisés comme contexte à la panne sont de 35 %, ce qui nécessite de maximiser le débit du réservoir B et donc d'utiliser la capacité maximale de la vanne d'alimentation de B. • La panne entraîne une baisse du niveau et une réduction du débit à la vanne de sortie du réservoir B. De plus, la température du liquide dans le réservoir augmente. Pour atteindre les objectifs de proportion et de température, il faut réduire l'ensemble des débits et du chauffage du processus.

Tableau 6-2: Description des pannes. (Suite)

Type de panne	Description
Vanne d'alimentation du réservoir B (suite).	• Cette panne peut être difficile à détecter car son effet sur le processus est atténué, au début, par la quantité de liquide dans le réservoir B. • La panne se produit à 300 secondes à partir du début des essais.
Chauffe-eau des réservoirs A et C.	• Les chauffe-eau A et C cessent graduellement de fonctionner (l'énergie fournie par le chauffe-eau A diminue de 2 % par seconde, et celle fournie par le chauffe-eau C diminue de 1 % par seconde). Les consignes de température à atteindre pour les essais utilisés comme contexte sont de 15°C, ce qui nécessite d'utiliser une portion importante de la capacité de chauffage du processus. • À court terme, cette panne cause une baisse importante de température; elle est donc relativement facile à détecter. Elle peut être compensée soit en réduisant les débits ou en utilisant la seule source de chaleur disponible, soit le chauffe-eau du réservoir B. Le réglage de ce dernier est toutefois difficile et il est facile de surcompenser et d'ainsi dévier de la consigne requise pour la température du mélange. • La panne se produit à 350 secondes du début de l'essai
Vanne d'évacuation du réservoir B.	• La vanne de sortie du réservoir B est bloquée à 20 % d'ouverture. Comme pour la panne affectant la vanne d'alimentation du réservoir B, les consignes de proportion à atteindre pour les essais utilisés comme contexte à la panne sont de 35 %, ce qui nécessite de maximiser le débit du réservoir B, et donc de pouvoir utiliser la capacité maximale de la vanne d'évacuation de B. • Cette panne empêche d'atteindre un débit élevé à la sortie du réservoir B, d'où une limite sur la production maximale possible. Sa détection est relativement facile mais peut être retardée si une quantité importante de liquide est présente dans le réservoir C. La gestion de cette panne requiert de réduire l'ensemble des débits et du chauffage. • La panne survient à 250 secondes du début de l'essai.

Tableau 6-2: Description des pannes. (Suite)

Type de panne	Description
Fuite dans le réservoir C	• Une perte survient dans le liquide acheminé au réservoir C; cette perte est en fait due à une fuite dans le réservoir. • Cette panne est très difficile à détecter pour plusieurs raisons. D'abord, elle survient suffisamment tard dans l'essai pour que la plupart des sujets aient stabilisé le processus. De plus, elle n'affecte ni la température du mélange ni sa proportion, ni les niveaux des réservoirs A et B. Même si la fuite est importante (10 % du liquide acheminé au réservoir C est perdu), la taille du réservoir et la capacité de production sont telles que le processus semble stable. Il est important de noter que toutes les informations requises pour identifier la présence de la panne, soit les débits d'entrée et de sortie du réservoir C, sont présentées en permanence sur l'IHM 1. Une stratégie simple consistant à s'assurer que les entrées et les sorties du réservoir C étaient les mêmes et que son niveau était stable permettait d'identifier la présence d'une anomalie. • La panne survient à 400 secondes du début de l'essai.

Pour cette série d'essais, on n'a pas observé d'ordre particulier de présentation. Ce choix a été motivé par le fait que chaque type de panne présente des difficultés uniques (p. ex., difficile à détecter ou difficile à gérer une fois détectée) pour lesquelles seules certaines variables ont été mesurées. De plus, toutes les mesures, sauf pour la charge mentale de travail, sont prises à partir du moment d'occurrence de la panne; ceci limite, sinon élimine, l'interaction entre les divers essais. Enfin, on s'intéresse aux résultats associés à chacun des essais pour chacun des types d'interfaces, plutôt qu'à l'évolution de la performance des sujets entre les essais.

Par ailleurs, à cause des problèmes de fichiers électroniques déjà évoqués à la section 6.1.2.4, les pannes n'ont pas été présentées dans le même ordre aux sujets. Cependant, pour les raisons qui viennent d'être données plus haut, nous croyons que cela n'a pas eu d'impact sur les résultats obtenus.

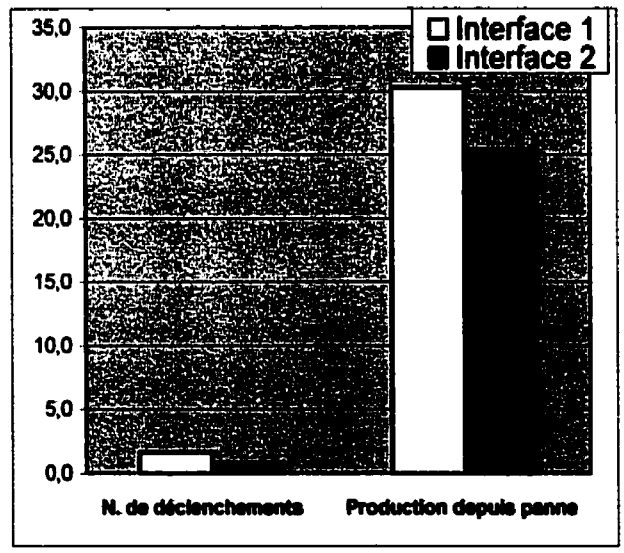
6.1.3 Résultats

On présente ici les résultats regroupés selon le type de panne pour chacun des groupes de sujets.

6.1.3.1 Panne de vanne d'alimentation du réservoir B

Le tableau suivant montre les résultats relatifs au nombre moyen de déclenchements des systèmes de sûreté et à la production moyenne depuis l'occurrence de la panne, pour chacun des groupes de sujets utilisant l'IHM 1 et l'IHM 2. Des résultats étaient disponibles pour les 10 sujets ayant utilisé l'IHM 1 et pour 5 des sujets ayant utilisé l'IHM 2.

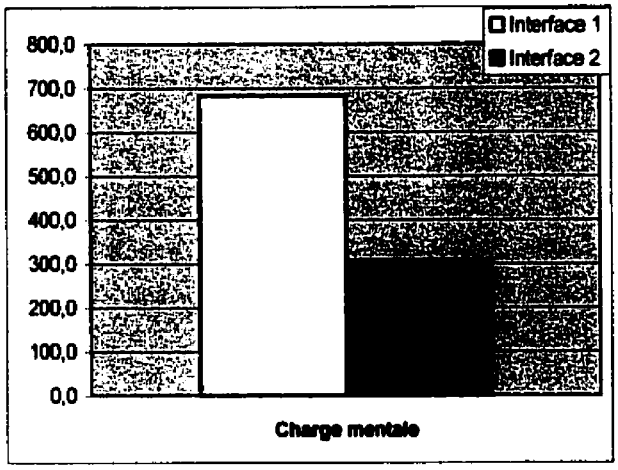
Tableau 6-3: Détection et diagnostic, panne d'alimentation du réservoir B.



IHM 1	1,7 déclenchements	30,3 m^3
IHM 2	0,8 déclenchements	25,4 m^3
Signification entre les écarts	$p < 0,836$ (voir détails à l'Annexe D)	$p < 0,806$ (voir détails à l'Annexe D)

Il n'y a pas de différences statistiquement significatives entre le nombre de déclenchements et la production pour les sujets utilisant les deux types d'interfaces. Bien que cette panne ait un effet assez important sur le processus, les sujets bénéficient d'une certaine latitude pour sa gestion; en effet, ils peuvent compter sur un inventaire de produit dans le réservoir B ce qui leur donne du temps pour élaborer une contre-mesure. Les données brutes indiquent d'ailleurs une variabilité assez forte pour les sujets de chaque groupe. Le tableau suivant montre la charge mentale pour chacun des groupes.

Tableau 6-4: Charge mentale, panne d'alimentation du réservoir B.



IHM 1	683,3 / 1000
IHM 2	305,2 / 1000
Signification entre les écarts	$p < 0,01$ (voir détails à l'Annexe D)

On constate que les sujets utilisant l'IHM 2 ont ressenti une charge mentale de travail inférieure à celle des sujets utilisant l'IHM 1 et que cette différence est significative. Un des facteurs permettant d'expliquer cette différence peut être que les sujets utilisant l'IHM 2 ont bénéficié d'une information faisant défaut aux autres sujets. En effet, le modèle fonctionnel a permis d'inclure dans l'IHM 2 une indication à l'effet qu'un but (le maintien du niveau dans le réservoir B) était menacé, sans toutefois indiquer la nature de

la panne. Cela a pu permettre aux sujets de prendre les actions requises plus tôt et d'ainsi réduire la charge mentale de travail qu'ils ressentaient. Cette explication apparaît encore plus plausible quand on examine les résultats de la performance des deux groupes, en termes de la qualité de la détection et du diagnostic de cette panne, montrées au tableau suivant.

Tableau 6-5: Performance de détection et de diagnostic, panne d'alimentation du réservoir B.

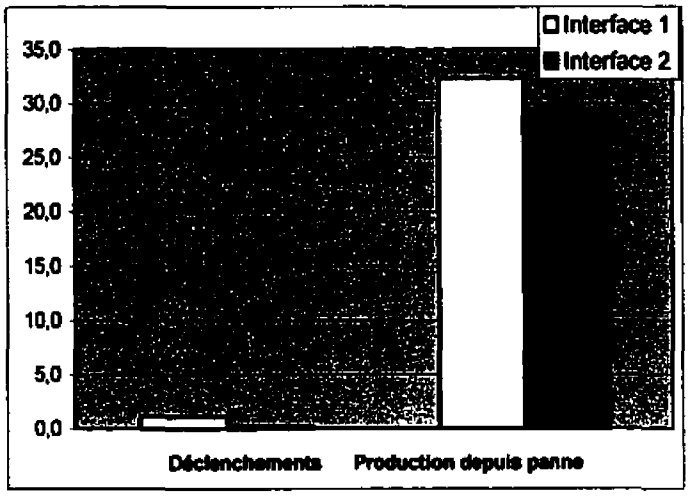
	Rangs des mesures de détection et de diagnostic		
	Détection et diagnostic corrects	**Détection correcte mais diagnostic incorrect ou incomplet**	**Pas de détection**
IHM 1	14, 27, 95, 263	1050, 1079, 1198	2000, 2000, 2000
IHM 2	11, 15, 320	1001, 1053	
Signification entre les écarts	p = 0,176 (voir Annexe D pour détails)		

Bien que la différence de performance entre les groupes n'atteigne pas un niveau statistiquement significatif, on note que trois des sujets utilisant l'IHM 1 n'ont pu détecter de panne, bien que cette dernière entraînait des perturbations importantes sur le système. La maîtrise de ces perturbations exigeait d'effectuer plusieurs manoeuvres sur le processus (illustrant, de ce fait, la relation entre les tâches de transition et les tâches de compensation déjà mentionnée précédemment), ce qui a pu affecter la charge de travail ressentie par les sujets.

6.1.3.2 Panne des chauffe-eau des réservoirs A et C

Le tableau suivant montre les résultats relatifs au nombre moyen de déclenchements des systèmes de sûreté et à la production moyenne depuis l'occurrence de la panne, pour chacun des groupes de sujets utilisant l'IHM 1 et l'IHM 2. Des résultats étaient disponibles pour les 10 sujets ayant utilisé l'IHM 1 et pour 5 des sujets ayant utilisé l'IHM 2.

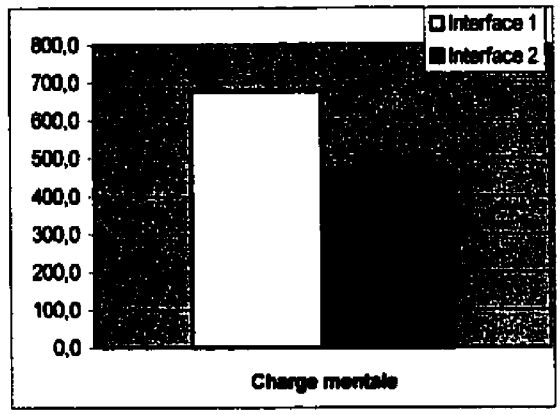
Tableau 6-6: Détection et diagnostic, panne des chauffe-eau des réservoirs A et C.



IHM 1	1,1 déclenchements	32,4 m^3
IHM 2	0,2 déclenchements	29,4 m^3
Signification entre les écarts	$p < 0,582$ (voir détails à l'Annexe D)	$p < 0,540$ (voir détails à l'Annexe D)

Comme pour la panne précédente, on constate qu'on n'a pas mis en évidence de différence statistiquement significative entre les groupes pour le nombre de déclenchements ni pour la production totale. L'examen des données brutes montre aussi une assez forte variabilité entre les sujets à l'intérieur de chaque groupe. Le tableau suivant présente les résultats concernant la charge mentale de travail ressentie par les sujets. On note que bien que les sujets utilisant l'IHM 2 aient ressenti une charge mentale moins élevée, cette différence n'atteint pas le seuil de signification requis.

Tableau 6-7: Charge mentale, panne des chauffe-eau des réservoirs A et C.



IHM 1	677 / 1000
IHM 2	465 / 1000
Signification entre les écarts	$p < 0,270$ (voir détails à l'Annexe D)

Enfin, le tableau suivant montre la performance des deux groupes en terme de la qualité de la détection et du diagnostic de ce type de panne.

Tableau 6-8: Performance du diagnostic, panne des chauffe-eau, réservoirs A et C.

	Rangs des mesures de détection et de diagnostic		
	Détection et diagnostic corrects	**Détection correcte mais diagnostic incorrect ou incomplet**	**Pas de détection**
IHM 1	9, 15, 48, 57, 77, 80, 112, 118, 200, 215		
IHM 2	5, 20, 45, 60, 107		
Signification entre les écarts	$p = 0,178$ (voir Annexe D pour détails)		

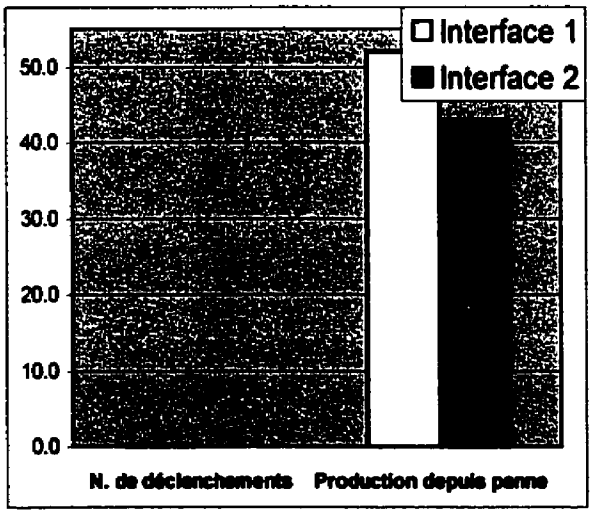
Le fait que le diagnostic ait été correct pour tous les sujets des deux groupes (ce qui peut être détecté par l'absence de rang supérieur à 1000 dans le tableau) n'est pas surprenant. En effet, cette panne ne laisse pas de choix aux sujets; pour continuer de

produire, ils doivent maintenir la température et ne disposent, initialement, que de trois sources de chauffage. Ils ont été forcés de les utiliser et cela les a vraisemblablement amenés à découvrir que deux de ces trois sources étaient défectueuses.

6.1.3.3 Panne de vanne d'évacuation du réservoir B

Comme le montrent les résultats du nombre de déclenchements et la production totale atteinte du tableau suivant, il s'agit d'une panne relativement facile à gérer. Des résultats étaient disponibles pour les 10 sujets ayant utilisé l'IHM 1 et pour cinq des sujets ayant utilisé l'IHM 2.

Tableau 6-9: Détection et diagnostic, panne de vanne d'évacuation du réservoir B.

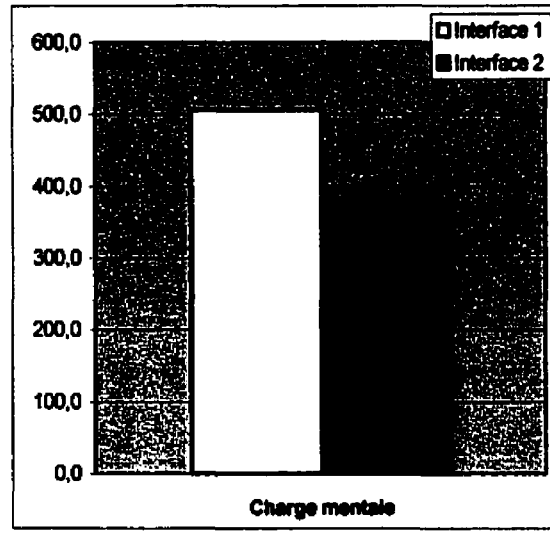


IHM 1	0,2 déclenchements	52,1 m^3
IHM 2	0 déclenchement	42,9 m^3
Signification entre les écarts	$p < 0,299$ (voir détails à l'Annexe D)	$p < 0,178$ (voir détails à l'Annexe D)

La constatation que la plupart des sujets ont assez facilement géré cette panne est aussi appuyée par les résultats sur la charge mentale de travail de chaque groupe qui sont

montrés au tableau suivant; on constate aussi que la charge de travail ressentie par les sujets des deux groupes est globalement moins élevée que pour les essais précédents.

Tableau 6-10: Charge mentale, panne d'évacuation du réservoir B.



IHM 1	506 / 1000
IHM 2	378 / 1000
Signification entre les écarts	$p < 0,462$ (voir détails à l'Annexe D)

La plupart des sujets des deux groupes ont aussi pu détecter correctement la présence d'une anomalie sauf pour un des sujets utilisant l'IHM 1. De plus, deux des sujets utilisant l'IHM 1 ont détecté la présence d'une anomalie mais n'ont pas pu en identifier la cause. Toutefois, les écarts de performance entre les deux groupes de sujets n'ont pas atteint le seuil requis pour être considérés comme significatifs. Le tableau suivant présente ces résultats.

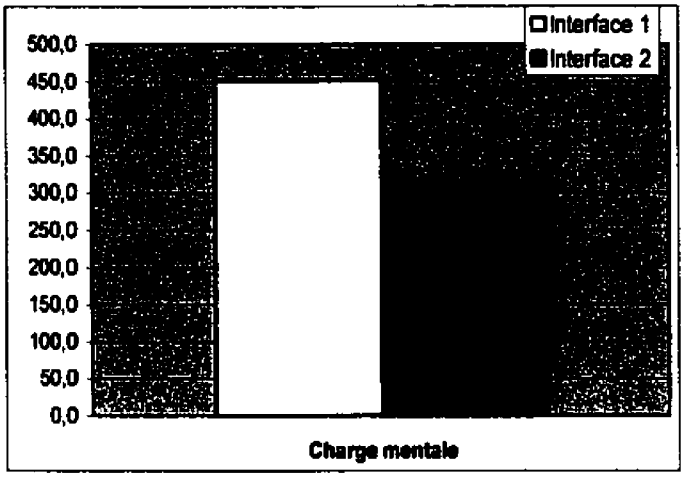
Tableau 6-11: Performance du diagnostic, panne d'évacuation du réservoir B.

	Rangs des mesures de détection et de diagnostic		
	Détection et diagnostic corrects	**Détection correcte mais diagnostic incorrect ou incomplet**	**Pas de détection**
IHM 1	12, 14, 24, 26, 45, 56, 224, 331	1110, 1037	
IHM 2	39, 98, 298, 316, 388		
Signification entre les écarts	p = 0,391 (voir Annexe D pour détails)		

6.1.3.4 Fuite dans le réservoir C

Comme on l'a expliqué au Tableau 6-2, cette panne consiste en une fuite dans le réservoir C; l'ampleur de la fuite est importante par rapport aux débits d'entrée du système, mais petite par rapport à la capacité du réservoir C. Elle n'entraîne pas de perturbations appréciables dans la conduite du processus et ne cause que peu d'impacts, du moins observables par les sujets, sur la production totale pour la durée de l'essai. La difficulté principale associée à cette panne est de la détecter plutôt que de la compenser. On s'est donc intéressé à la charge mentale de travail ressentie par les sujets et à leur performance dans la détection et l'identification de la cause de la panne. Des résultats étaient disponibles pour les 10 sujets ayant utilisé l'IHM 1 et pour 7 des sujets ayant utilisé l'IHM 2. Le tableau suivant montre la charge mentale pour chacun des groupes.

Tableau 6-12: Charge mentale, fuite dans le réservoir C.



IHM 1	451,5 / 1000
IHM 2	313,7 / 1000
Signification entre les écarts	$p < 0,242$ (voir détails à l'Annexe D)

La différence entre les charges ressenties par les deux groupes de sujets n'a pas atteint le seuil de signification statistique. Cependant, on observe que la charge de travail ressentie par les sujets utilisant l'IHM 1 était la plus faible parmi toutes celles déclarées par ces mêmes sujets pour tous les types de pannes. Les sujets utilisant l'IHM 2 ont aussi ressenti une charge faible, mais plus élevée que celle ressentie lors de la panne d'alimentation du réservoir B, laquelle avait pourtant des effets plus importants sur l'atteinte des objectifs d'opération du processus. Cette différence peut n'être due qu'à une variation de l'échantillonnage, mais l'examen des résultats du tableau suivant suggère une autre explication.

Tableau 6-13: Performance du diagnostic, fuite dans le réservoir C.

	Rangs des mesures de détection et de diagnostic		
	Détection et diagnostic corrects	**Détection correcte mais diagnostic incorrect ou incomplet**	**Pas de détection**
IHM 1			2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000
IHM 2	3, 80, 120,	1001, 1004, 1009, 1035	
Signification entre les écarts	p = 0,001 (voir Annexe D pour détails)		

Il faut rappeler que le témoin identifiant la présence d'une menace à l'un des buts, soit le maintien du niveau dans le réservoir C, ne donnait aucun indice sur la cause de l'anomalie. On note qu'en dépit de la disponibilité de toutes les informations pour la détecter et en sachant qu'une anomalie était susceptible de se produire, aucun des sujets utilisant l'IHM 1 n'a identifié la présence d'une panne. Par ailleurs, l'observation des essais a aussi montré que quatre des sept sujets utilisant l'IHM 2 ont détecté la panne et tenté d'en identifier la cause mais sans y parvenir. Ceci pourrait contribuer à expliquer que la charge mentale de travail ressentie par ces sujets n'ait pas été moindre que celle ressentie lors d'une panne requérant pourtant plus de manoeuvres pour être maîtrisée.

6.1.3.5 Autres résultats

Un résultat découlant directement des analyses précédentes est la remise en question de l'utilité de la présentation brute des informations aux fins de surveillance du processus, comme cela est fréquemment pratiqué dans les interfaces traditionnelles (voir par exemple l'interface montrée à la Figure 2-1). Il ne suffit pas que les informations soient disponibles en tout temps; il faut aussi qu'elles soient analysées de façon continue par les opérateurs pour déterminer si un des buts d'opération est compromis. Même en faisant abstraction des problèmes de vigilance qui sont susceptibles de se poser, le nombre et la

complexité des relations possibles entre les variables sont tels qu'ils est très improbable qu'un opérateur soit en mesure d'effectuer les détections requises, même pour un petit nombre de variables.

Une autre constatation est qu'en dépit du fait que l'information de l'IHM 2 était répartie sur plus d'un panneau, les sujets qui l'utilisaient ont eu une performance au moins aussi bonne, et dans certains cas supérieure, à celle des sujets utilisant l'IHM 1, où toute l'information était affichée sur un seul panneau.

Bien que les données collectées ne permettent pas d'étayer ce point de façon stricte, l'observation de plusieurs sujets suggère que la stabilité du processus a influencé la détection de l'occurrence d'une anomalie pour les sujets utilisant l'IHM 1. Quand les sujets effectuaient des transitions sur le processus, il devenait plus difficile de déterminer si une perturbation était due aux manoeuvres en cours ou à une panne dans le processus.

Enfin, et contrairement à ce qui était anticipé, mais conformément à ce qui s'est passé dans le cas de la conduite en situations normales, on n'a pas observé d'utilisation des graphiques de tendances pour identifier l'origine de l'anomalie. Un facteur permettant d'expliquer cette constatation est le fait que la plupart des sujets utilisaient une stratégie de détection par exception, c'est-à-dire réagissaient lorsqu'une perturbation survenait (pour les sujets utilisant l'IHM 1) ou qu'un témoin indiquait une menace à l'atteinte d'un des buts (pour les sujets utilisant l'IHM 2). Lorsque la détection d'une perturbation ou d'une menace survenait, les sujets se concentraient sur la compensation du processus et identifiaient généralement, en cours de route, l'élément à l'origine de l'anomalie.

6.1.4 Synthèse des résultats expérimentaux pour les situations incidentelles

Dans les sous-sections précédentes, on a analysé séparément les résultats obtenus pour chacune des pannes. On présente ici une synthèse de ces résultats et on voit si les objectifs visés par cette validation (voir la section 6.1.1) ont été atteints. Le tableau suivant montre d'abord la synthèse; on y utilise les conventions suivantes :

- On indique par « -- » (pour l'IHM 1) ou « ** » (pour l'IHM 2) le cas où les résultats obtenus lors de la validation d'une interface ont été supérieurs à ceux obtenus pour l'autre, mais que cette différence n'atteint pas le seuil de signification de 0,05.
- On indique par « ---- » (pour l'IHM 1) ou « **** » (pour l'IHM 2) le cas où les résultats obtenus lors de la validation d'une interface ont été supérieurs à ceux obtenus pour l'autre et que cette différence atteint ou dépasse le seuil de signification de 0,05.

Tableau 6-14: Synthèse des résultats en situations incidentelles.

	Production totale		**Charge mentale**		**Nombre de déclenchements**		**Performance en détection et en diagnostic**	
	Interface		**Interface**		**Interface**		**Interface**	
Type de panne	**1**	**2**	**1**	**2**	**1**	**2**	**1**	**2**
Vanne d'alimentation réservoir B	--			++++		++		++
Vanne d'évacuation, réservoir B	--			++		++		++
Chauffe-eau, réservoirs A et C	--			++		++		++
Fuite réservoir C	--			++		++		++++

On peut maintenant déterminer si l'interface Tagci est globalement supérieure, sinon égale, à une interface conventionnelle pour l'atteinte des différents objectifs. Ainsi, on a évalué la performance des sujets pour:

- Stabiliser le processus et poursuivre la production en mesurant la production totale depuis l'occurrence de la panne. Dans tous les cas, et en considérant la tendance générale des résultats (aucun résultat significativement supérieur, mais quatre résultats supérieurs même si non statistiquement significatifs) les sujets exploitant l'IHM 1 ont eu une performance globalement supérieure à celle des sujets exploitant l'IHM 2. Ce résultat est à rapprocher de celui obtenu lors de la validation en situations normales.

- Maintenir une charge de travail acceptable pour les opérateurs en mesurant la charge mentale de travail. Dans tous les cas, et en considérant la tendance générale des résultats (un résultat significativement supérieur, et trois résultats supérieurs même si non statistiquement significatifs), les sujets exploitant l'IHM 2 ont eu une performance supérieure à celle des sujets exploitant l'IHM 1. L'exploitation de l'IHM 2 semble donc induire une charge de travail moindre que celle de l'IHM 1. Il faut noter que contrairement aux essais en situations normales, on ne peut pas compter sur le fait que cette charge de travail va « diminuer avec la pratique ». En effet, comme il s'agit de la gestion de situations incidentelles, la seule pratique proviendrait de la répétition du même genre de pannes de façon suffisamment fréquente pour que les sujets développent des stratégies adéquates.

- Maintenir les conditions de sûreté du processus en mesurant le nombre de déclenchements des systèmes de sûreté. Dans tous les cas, et en considérant la tendance générale des résultats (aucun résultat significativement supérieur, mais quatre résultats supérieurs même si non statistiquement significatifs), les sujets exploitant l'IHM 2 ont eu une meilleure performance que ceux exploitant l'IHM 1.

- Détecter et identifier la cause d'anomalies en mesurant leur performance en détection

et en diagnostic. Dans tous les cas, et en considérant la tendance générale des résultats (un résultat significativement supérieur, et trois résultats supérieurs même si non statistiquement significatifs), les sujets exploitant l'IHM 2 ont eu une meilleure performance que ceux exploitant l'IHM 1.

De façon globale, on conclut donc que l'IHM 2 s'est révélée légèrement supérieure à l'IHM 1 en termes de charge mentale de travail induite, de maintien des conditions de sûreté du processus, et de détection et diagnostic d'anomalies. Toutefois, l'IHM 1 s'est révélée légèrement supérieure pour la production brute obtenue à partir de l'occurrence des pannes.

La validation précédente s'est limitée à l'évaluation de Tagci pour une application à petite échelle. À la section suivante, on présente les résultats d'une validation non-expérimentale, mais complémentaire, pour une application de grande envergure.

6.2 *Validation de Tagci dans une application nucléaire*

Cette validation a permis de démontrer que la méthode Tagci peut être utilisée pour réaliser des IHM destinées à la détection d'anomalies pour des processus de grande envergure. On a effectué cette démonstration comme suit:

- On a d'abord réalisé et validé une IHM pour soutenir des tâches de détection pour une application dans une centrale nucléaire CANDU[22], mais sans recourir à Tagci.
- On a ensuite analysé cette IHM en utilisant Tagci pour déterminer si cette méthode permettait d'expliquer la présence des divers types d'informations qu'on retrouvait

---

[22] Cette IHM a été réalisée alors que l'auteur était à l'emploi d'Énergie Atomique du Canada Limitée – Division Recherche (ÉACL Recherche), de 1991 à 1994, au Laboratoire nucléaire de Chalk River, Ont. Seuls les résultats et informations déjà publiés dans la littérature technique et scientifique publique sont rapportés ici.

sur l'IHM, et pour s'assurer que celle-ci ne fournissait pas plus d'informations que ce qui était requis selon Tagci.

Dans les sections suivantes, on présente ces deux étapes et on discute des résultats obtenus lors de cette validation.

6.2.1 IHM originale

On décrit ici le processus pour lequel l'IHM a été élaborée et les étapes suivies pour en assurer la conception; on décrit aussi l'IHM résultante.

6.2.1.1 Processus

La figure suivante montre une vue schématique d'une centrale nucléaire CANDU[23].

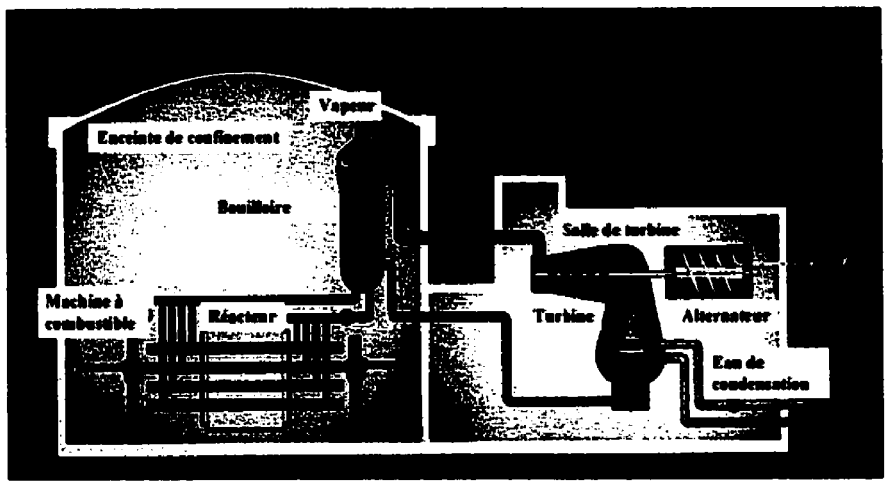


Figure 6-1: Schéma général d'une centrale nucléaire CANDU[24].

De façon simplifiée, ce type d'installation fonctionne comme suit:

- De l'eau (aussi appelée caloporteur) est chauffée par circulation dans les éléments appropriés d'un réacteur nucléaire pour être acheminée à des bouilloires. Une seule

---

[23] Pour CANada Deuterium Uranium.

[24] Image tirée et adaptée à partir du site: www.cannon.net/~gonyeau/nuclear/candu.htm.

bouilloire est montrée dans la figure, mais plusieurs peuvent être utilisées selon la conception de la centrale.

- La chaleur du caloporteur est transférée à l'eau contenue dans la bouilloire par l'entremise d'un échangeur de chaleur; cette eau est transformée en vapeur qui est ensuite acheminée à un ensemble de turbines raccordé à un alternateur.
- Après avoir actionné l'ensemble de turbines, la vapeur est condensée et ré-acheminée à la bouilloire.

Lors de l'arrêt d'une telle centrale (par exemple suite à un incident), l'atteinte des buts de sûreté suivants est primordiale:

- maintenir le réacteur à l'arrêt,
- maintenir le refroidissement du combustible pour éviter des fissures aux gaines des faisceaux de combustibles et ainsi prévenir l'émission de matières radioactives,
- maintenir l'herméticité de l'enceinte de confinement pour qu'aucune émission (gazeuse ou liquide) ne s'en échappe.

Chacun de ces buts peut être décomposé en sous-buts; on peut associer des paramètres à chacun de ces buts et sous-buts pour en mesurer l'atteinte. Le tableau suivant décrit ces buts et sous-buts ainsi que les paramètres associés (ces derniers sont entre parenthèses).

Tableau 6-15: Buts, sous-buts et paramètres pour une centrale nucléaire.

But(s) et sous-but(s) (paramètre(s) associé(s))
• Maintenir le réacteur à l'arrêt (puissance instantanée du réacteur).
• Maintenir le refroidissement du combustible (marge de sous-refroidissement du caloporteur[25]). - Maintenir le niveau d'eau dans les bouilloires (mesure du niveau). - Maintenir la pression dans les bouilloires (mesure de la pression).
• Maintenir l'herméticité de l'enceinte de confinement. - Maintenir la pression à l'intérieur de l'enceinte de confinement à une valeur plus basse que celle de l'atmosphère extérieure (mesure de la pression). - Maintenir le niveau d'eau dans le puisard à l'intérieur des limites (mesure du niveau). - Maintenir l'étanchéité du circuit de deutérium (mesure, de type binaire (« oui-non »), de la présence de deutérium).

En cas de menace à un de ces buts, on utilise une procédure orientée vers les symptômes (voir la section suivante) pour assurer le rétablissement du but de sûreté.

6.2.1.2 Élaboration de l'IHM

L'IHM est destinée à des opérateurs de centrales nucléaires CANDU; elle doit permettre à un opérateur de surveiller des paramètres reliés à l'atteinte des buts de sûreté du processus. Dans l'éventualité d'une menace à un ou plusieurs de ces buts, l'opérateur peut déclencher l'utilisation d'une compensation « orientée vers les symptômes » (du type de celle décrite à la section 3.3.3). L'exécution de la tâche était soutenue auparavant par l'exploitation d'indicateurs analogiques ou de lampes pilotes disséminés dans la salle de commande. L'IHM présentée ici vise à faciliter l'exécution

[25] Cette mesure correspond à la distance entre un point défini par l'intersection des valeurs de pression et de température du caloporteur et la courbe de saturation thermodynamique de ce dernier.

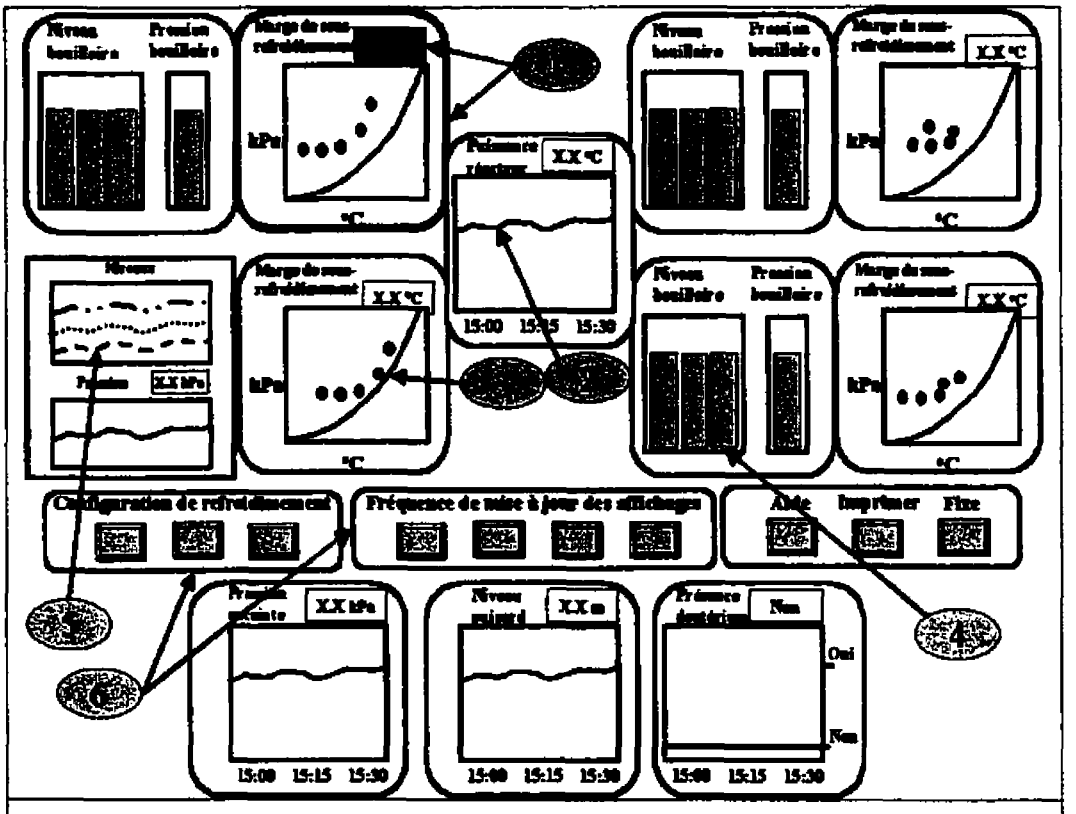
de la tâche; de plus, elle ne soutient que la tâche de surveillance, le soutien pour une compensation éventuelle n'y ayant pas été intégré.

La centrale nucléaire pour laquelle l'IHM a été élaborée est similaire à celle décrite dans la section précédente, sauf pour l'utilisation de quatre groupes de trois bouilloires. Les étapes suivantes ont été franchies lors de l'élaboration de l'IHM (Jones et al., 1993):

- Identification et caractérisation des opérateurs devant utiliser l'interface.
- Analyse de la tâche des opérateurs.
- Production d'un premier prototype de l'IHM, évaluation de ce prototype avec des opérateurs lors de simulations d'incidents dans un simulateur pleine échelle, et améliorations au prototype. Il faut noter que les évaluations mentionnées ici consistent à s'assurer que l'opérateur peut utiliser l'IHM pour exécuter sa tâche et que cette dernière contient toutes les informations requises pour y parvenir.
- Production d'un second prototype de l'IHM, évaluations additionnelles, et production d'un prototype final; ce dernier prototype fut considéré comme répondant adéquatement aux besoins.

Le tableau suivant montre les éléments de l'IHM du prototype final, tel qu'adapté de (Jones et al., 1993).

Tableau 6-16: Interface du prototype final.



Cette interface a les caractéristiques suivantes:

- L'interaction de l'opérateur avec les éléments de l'IHM s'effectue par l'entremise d'un écran tactile.
- Des indications pour signaler qu'une valeur limite a été dépassée (voir 1 dans la figure). Ces indications sont le codage par couleur (rouge) pour l'arrière-plan des indicateurs numériques et le clignotement de la bordure, alternativement en rouge et en noir; ceci permettait d'accommoder les cas de déficience de couleur (p. ex., un daltonien ne pouvant voir le rouge aurait détecté le clignotement de la bordure noire). Ces indicateurs sont utilisés pour tous les éléments de l'IHM.
- Un graphique de tendance de la puissance du réacteur (voir 2 dans la figure).
- Un « graphique PT » (pour pression et température) (voir élément 3 dans la figure). On y représente les valeurs récentes (souvent, pour les dernières 30 ou 60 secondes) de la pression et de la température ainsi que la courbe de saturation thermodynamique du liquide (ici, de l'eau lourde).

Tableau 6-16: Interface du prototype final. (Suite)

- (Suite, graphique PT) : La suite de points noirs correspond ainsi à l'intersection des valeurs de pression et de température et permet à l'opérateur d'évaluer la marge de sous-refroidissement correspondante (la valeur la plus récente est aussi affichée numériquement). Enfin, le point le plus récent est mis en évidence (plus grande taille et clignotement) pour faciliter l'interprétation du graphique par l'opérateur.
- Des graphiques à barres, avec une barre pour le niveau de chacune des bouilloires, et une barre pour la pression commune d'un groupe de trois bouilloires (voir élément 4 dans la figure).
- Des graphiques de tendances des différents niveaux et pressions dans les bouilloires (voir élément 5 dans la figure). L'opérateur peut accéder à ces graphiques de tendances en touchant les graphiques à barres correspondants (ou vice-versa, pour revenir aux graphiques à barres).
- Des boutons-poussoirs servent à modifier le choix de certaines des variables mesurées pour évaluer l'atteinte des objectifs (configuration de refroidissement), à contrôler la fréquence de mise à jour de l'affichage et à permettre d'activer des fonctions secondaires (p. ex., obtenir de l'aide, imprimer ou rendre fixe (désactiver) l'écran tactile).

6.2.2 Analyse de l'IHM finale avec Tagci

On veut maintenant déterminer si Tagci permet d'expliquer la présence des divers types d'informations présents dans l'interface décrite à la section précédente; on veut aussi s'assurer que l'IHM ne fournissait pas plus d'informations que ce qui était requis selon Tagci. Pour y parvenir, on compare systématiquement les besoins en informations prescrits par Tagci (selon le Tableau 3-2) pour la surveillance de l'atteinte des buts et sous-buts identifiés au Tableau 6-15 et les informations offertes par l'IHM finale. Le tableau suivant montre les résultats de cette comparaison.

Tableau 6-17: Analyse de l'IHM finale avec Tagci.

	Informations requises pour détecter l'atteinte des buts et sous-buts.					
	Maintenir le réacteur à l'arrêt.		Maintenir le refroidissement du combustible (marge de sous-refroidissement, niveau d'eau et pression dans les bouilloires).		Maintenir l'herméticité de l'enceinte de confinement (pression dans l'enceinte, niveau dans le puisard, et étanchéité du circuit de deutérium).	
Informations offertes par l'IHM finale.	Except.	Implicat.	Except.	Implicat.	Except.	Implicat.
Codage par couleur de l'arrière-plan des indicateurs numériques, et clignotement de la bordure.	√		√ (marge de sous-refroidisse-ment seulement)		√	
Graphique de tendances – puissance du réacteur.		√				
Graphique PT – marge de sous-refroidissement.				√		
Graphiques à barres – niveaux dans les bouilloires.			√			
Graphiques à barres – pressions dans les bouilloires.			√			
Graphiques de tendances - niveaux dans les bouilloires.				√		
Graphiques de tendances - pressions dans les bouilloires.				√		
Graphique de tendances – pression dans l'enceinte, niveau du puisard et présence de deutérium.						√

Par ailleurs, les autres types d'informations reliés aux tâches de conduite principales montrés au Tableau 6-16 sont les choix offerts pour la configuration de refroidissement du combustible. Selon la configuration retenue (p. ex., utilisation des bouilloires ou d'autres dispositifs pour évacuer la chaleur), les sous-fonctions à surveiller peuvent changer; Tagci permet de tenir compte de cette caractéristique au moyen de la règle de conception suivante: « ... indiquer si les fonctions sont requises et disponibles selon la situation (p. ex., en allure de marche) » (voir le Tableau 3-2).

Les autres boutons-poussoirs sont associés à:

- Des fonctions secondaires (p. ex., imprimer, demander de l'aide, désactiver l'écran tactile pour pouvoir pointer des informations sur l'affichage), auxquelles Tagci n'est pas destiné.
- Des choix de la fréquence de mise à jour des affichages (qui dépend à la fois des caractéristiques du système d'acquisition et de la vitesse de changement du processus); ceci permet d'afficher de l'information à une fréquence appropriée (p. ex., certaines informations varient lentement et ne gagnent pas à être affichées aussi rapidement qu'une fois par seconde) ou encore d'afficher un graphique de tendances couvrant une plus longue période de temps (en sélectionnant une fréquence d'échantillonnage moins élevée). Même si Tagci ne va pas, dans sa version courante, à ce niveau de détail, on peut envisager en étendre la portée de façon à pouvoir traiter de façon plus explicite les aspects temporels du processus.

Les résultats de l'analyse de l'IHM finale et de la comparaison de ses types d'informations avec ceux prescrits par Tagci confirment les hypothèses de la section 6.2, sauf pour l'ajout d'une extension éventuelle permettant de traiter plus explicitement les aspects temporels. Ainsi, on peut affirmer que:

- Tagci permet d'expliquer la présence des types d'informations qu'on retrouve dans

l'IHM finale.

- L'IHM finale ne fournit pas plus d'informations que celles requises par Tagci, sauf pour l'exception notée précédemment.

Enfin, en adoptant le point de vue de l'avocat du diable, on pourrait relever une faille potentielle dans cette validation. En effet, l'auteur de cette thèse est aussi le concepteur de l'IHM finale qui a servi de référence pour la validation, ce qui aurait pu en biaiser les résultats. Toutefois, cette faille n'est pas vraisemblable car on se retrouve dans l'une ou l'autre des situations suivantes:

- Soit la conception de l'IHM finale a bénéficié (de façon inconsciente pour le concepteur) des idées sous-jacentes ayant mené à l'élaboration de Tagci. Dans ce cas, et comme l'IHM finale est réputée être adéquate pour les fins auxquelles elle est destinée (Jones et al., 1993), on dispose d'une validation directe de Tagci.

- Soit la conception de l'IHM finale n'a pas bénéficié des idées sous-jacentes à Tagci; dans ce cas, les conclusions tirées précédemment à l'effet que Tagci permet de spécifier les types d'informations correspondants à ceux de l'IHM finale sont justifiées.

CHAPITRE 7: DISCUSSION

Dans ce chapitre, on discute d'abord des résultats globaux obtenus lors des validations expérimentales en regard de l'atteinte des objectifs énoncés au début de cette recherche. On discute aussi d'autres éléments découlant des travaux qui ont été exécutés.

7.1 Résultats globaux et atteinte des objectifs

On rappelle d'abord les objectifs de cette recherche (voir la section 1.3):

> « ... définir et ... tester une méthode pour identifier le type de contenu et l'organisation de l'information à fournir à un opérateur pour surveiller et commander efficacement un système complexe... »
>
> « ... on vise également à ce que la méthode soit aussi simple que possible à mettre en œuvre... »

Une première validation en situations normales a permis de démontrer que l'exploitation d'une IHM Tagci permettait d'améliorer la stabilité du processus comparativement à une IHM traditionnelle. De plus, les moyennes des mesures de charge mentale de travail lors des deux sessions d'essais et le nombre moyen de déclenchements lors de la première session d'essais sont systématiquement favorables pour les sujets utilisant l'IHM 2. Même si ces avantages n'atteignent pas le seuil de signification statistique requis, on croit possible de démontrer la supériorité de cette IHM pour ces mesures si on disposait d'effectifs plus importants. Par ailleurs, la production totale atteinte par les sujets exploitant l'IHM 2 a été systématiquement inférieure à celle des sujets utilisant l'autre IHM; même si ici aussi, les écarts n'atteignaient pas le seuil de signification requis, ces résultats suggèrent que cet aspect de la méthode Tagci doit être examiné davantage. Il est possible que cette différence, si elle est confirmée, soit attribuable à la procédure prescrite par Tagci; dans ce cas, une amélioration à cette dernière permettrait de pallier la situation. Une autre explication est que les sujets exploitant l'IHM Tagci

adhèrent de façon plus stricte aux consignes qui leur ont été communiquées, soit de maintenir les niveaux des réservoirs près de leur valeur nominale (2 m), ce qui maintient le processus dans un état plus équilibré, mais les prive de la possibilité de maximiser la production lors d'un essai d'une durée de 15 minutes.

Une seconde validation en situations anormales a montré que les sujets exploitant l'IHM 2 avaient eu une performance légèrement supérieure à ceux utilisant l'IHM 1, par rapport à la charge mentale de travail, le nombre de déclenchements, et la détection et l'identification de la cause d'anomalies. Comme pour les situations normales, et bien que les écarts n'atteignent pas les seuils de signification requis, la production totale des sujets exploitant l'IHM 1 a été supérieure à celle des sujets exploitant l'IHM 2.

Les deux validations précédentes portaient sur des mesures de performance pour des sujets travaillant sur un processus de petites dimensions dans des études en laboratoire. On a complété ces travaux au moyen d'une validation additionnelle consistant à analyser avec Tagci une interface conçue et validée par l'auteur pour une application dans un processus de grande envergure (une centrale nucléaire). Cette analyse a montré que Tagci permettait d'expliquer la présence des divers types d'informations qu'on retrouvait sur cette IHM; elle a aussi montré que l'IHM analysée ne fournissait pas plus d'informations que ce qui était requis selon Tagci. De plus, cette validation a permis d'illustrer la relative simplicité d'utilisation de Tagci soit pour analyser une IHM existante, ou pour en concevoir une nouvelle.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus sont encourageants et on a réussi à démontrer des bénéfices liés à l'utilisation de Tagci. Cependant, les validations expérimentales n'ont pas permis d'en montrer les avantages de façon aussi nette qu'on l'aurait souhaité. En dépit de ceci, nous sommes d'avis que les avantages qui ont été identifiés sont suffisants pour que le développement et la validation de Tagci soient poursuivis. Toutefois, pour

maximiser les chances de succès d'une telle entreprise, on devra éliminer certains obstacles. Ces obstacles sont les suivants:

- L'ampleur et les caractéristiques du processus: on a retenu un processus qui a souvent servi d'étalon pour les recherches dans ce domaine. Bien que ce choix présente plusieurs avantages (voir section 5.2.1), il présente aussi des inconvénients. Ainsi, alors que plusieurs des variables du processus évoluent relativement lentement, d'autres (p. ex., la proportion) peuvent changer rapidement. Le focus de la tâche de l'opérateur se déplace donc d'une activité d'implantation et de suivi d'un plan se déroulant lentement à une activité où les habiletés neuro-motrices (p. ex., réagir en quelques secondes en manipulant une souris) prennent plus d'importance. Il apparaît donc que l'horizon temporel de la tâche ait une importance plus grande qu'il n'avait été anticipé, autant pour Tagci que pour les autres méthodes qui ont été examinées; on devrait donc tenir compte de cet aspect de façon explicite lors des travaux subséquents de développement de Tagci.

- Nombre de sujets: les effectifs pour les situations normales étaient modestes (20 sujets au total), et encore plus pour les situations anormales (15 sujets au total). Il apparaît indispensable de miser à l'avenir sur des effectifs plus importants en dépit des problèmes de recrutement et de rétention des sujets qui sont susceptibles de se poser.

7.2 *Autres éléments*

On discute ici de divers autres éléments découlant soit des validations qui ont été exécutées, d'observations effectuées ou de constatations sur la base de l'expérience acquise durant cette recherche.

Une première constatation porte sur le fait que dans une IHM conventionnelle, les informations affichées comprennent généralement l'ensemble des mesures disponibles,

présentées sur des schémas mécaniques animés. Ainsi, au-delà d'améliorations locales portant sur des éléments comme la lisibilité, les codes de couleurs utilisés, la disposition des éléments de présentation ou d'interaction, etc., il demeure peu d'avenues d'amélioration ouvertes au concepteur; il est aussi difficile de quantifier les bénéfices à tirer des améliorations locales mentionnées. Dans une interface Tagci, les améliorations locales mentionnées restent possibles; toutefois, on peut aussi faire porter les efforts d'améliorations sur des aspects de l'interface liés directement à l'amélioration de la performance de l'ensemble humain-machine. Par exemple, s'il s'avère difficile d'effectuer le démarrage d'une unité de production à cause de la complexité de l'opération ou du nombre d'éléments à coordonner, on peut concentrer les efforts sur les éléments de la tâche de transition correspondante. Comme cette segmentation de l'information n'existe pas pour les interfaces traditionnelles, cette avenue de solution devient considérablement plus difficile à exploiter à l'intérieur de ces dernières. Enfin, comme des éléments d'une interface Tagci peuvent être reliés directement à des mesures de performance de la tâche (p. ex., le soutien à la tâche de transition mentionnée peut être relié directement à la performance de l'exécution de la tâche), la quantification des bénéfices escomptés apparaît plus facile à établir.

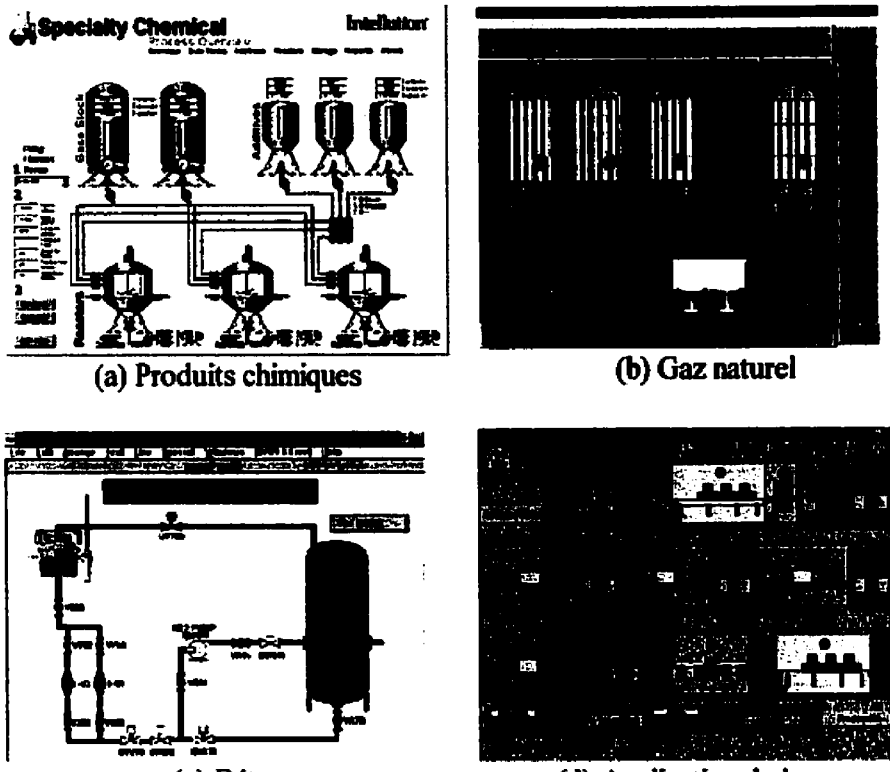
Par ailleurs, on fait souvent allusion, dans la littérature, aux problèmes posés par le passage des interfaces câblées, où beaucoup d'information est présentée de façon plus ou moins parallèle, aux interfaces informatisées, où l'information est présentée de façon plus segmentée ou en série (soit sur des affichages qui doivent être consultés un à un). Les résultats obtenus jusqu'ici indiquent que ce passage d'une interface parallèle (IHM 1) à une interface où une partie de l'information est présentée en série (IHM 2) ne conduit pas forcément à une dégradation de la performance de l'opérateur si on fournit et on organise l'information suivant ce qui est recommandé par la méthode Tagci.

Selon les observations réalisées lors des validations en situations normales et anormales et l'expérience acquise lors de la conception et de la validation de l'IHM 2, il apparaît illusoire de vouloir construire des interfaces destinées aux opérations qui soient entièrement transparentes, c'est-à-dire capables d'expliciter toutes les relations existant entre les variables du processus, de façon à permettre à l'opérateur d'élaborer seul un plan de conduite optimal. Il semble en effet que certaines connaissances spécifiques portant sur la conduite d'un processus doivent être maîtrisées pour avoir une performance adéquate (p. ex., il faut équilibrer la quantité de matériel entrant et sortant pour maintenir un niveau stable dans un réservoir, ou encore, la pression exercée à l'entrée d'une vanne fera varier son débit pour une ouverture donnée). Il pourrait être possible de rendre ce type d'informations disponible sur chacune des images de l'interface, mais plusieurs difficultés importantes subsisteraient. D'abord, le fait que les informations soient disponibles ne garantirait pas qu'elles soient comprises, sans soutien, par tous les opérateurs. Ensuite, la définition de l'information requise et l'implantation de représentations appropriées à travers une interface d'une ampleur même modeste demanderaient un effort très important (à titre d'exemple pour un système très simple, voir Pawlak et Vicente, 1994).

On offre aussi, à l'intérieur des limites de cette recherche, une définition de ce qu'est la « vue d'ensemble », chère à plusieurs concepteurs et opérateurs de systèmes complexes. Il n'existe pas, à notre connaissance, de définition opérationnelle de ce concept; toutefois, la figure suivante montrent des exemples typiques d'images utilisées à cette fin[26].

---

[26] L'image (a) provient du site www.intellution.com, les images (b) et (c) proviennent du site www.wonderware.com, l'image (d) provient de www.barberan.es/i_Novedades.htm,



(a) Produits chimiques (b) Gaz naturel

(c) Béton (d) Application de lacque

Figure 7-1: Exemples de vues d'ensemble usuelles.

Dans la figure, on remarque la prédominance d'informations permettant de répondre à des questions du type « comment c'est fait? » plutôt que du type « est-ce que les objectifs visés sont atteints? ». Dans une IHM Tagci, la perspective fonctionnelle permet de définir ce concept comme correspondant à une vue soutenant la détection de l'atteinte (ou de façon équivalente, d'une menace à l'atteinte) des buts visés par l'opération du système. En d'autres termes, une telle vue permet de répondre à la question « est-ce que le système humain-machine atteint les objectifs? » plutôt que « à quoi est-ce que le système ressemble? ». À partir de cette définition, on peut voir comment Tagci permet de gérer la surveillance d'un très grand nombre de paramètres pour s'assurer qu'ils n'excèdent pas les limites auxquelles ils sont assujettis. Traditionnellement, on a tenté de résoudre ce problème en faisant appel à des systèmes

de gestion des alarmes; la mise en oeuvre de ce type de systèmes a eu des résultats très mitigés quant à la réduction du nombre d'alarmes et à la qualité de l'information produite (Brown, 1999a, 1999b; par ailleurs, pour une discussion très complète sur ce sujet, voir par exemple Stanton, 1994). Dans Tagci, la vue d'ensemble fonctionnelle (qui peut être fournie à plus d'un niveau, ou qui peut être scindée en quelques vues complémentaires) permet de résoudre une grande partie de ces difficultés. On permet alors à l'opérateur de se concentrer sur l'information lui permettant d'évaluer l'atteinte des buts principaux de l'opération plutôt que de tenter de tout voir ou, à défaut, de se fier à un système de gestion d'alarme qui risque de le noyer sous un déluge d'information.

CHAPITRE 8: CONCLUSION

Ce chapitre conclut les travaux qui ont été effectués jusqu'ici. On y identifie d'abord les limites et les contraintes de la recherche qui a été réalisée, et on indique ensuite ses contributions à l'avancement de la connaissance. On suggère aussi de nouvelles voies de recherche.

8.1 Limites de la recherche

Plusieurs limites ont affecté les résultats de cette recherche et leur interprétation. Ces limites sont liées, d'une part, à la portée de la méthode et, d'autre part, aux expérimentations qui ont été réalisées.

Comme on l'a indiqué, la méthode Tagci a une portée limitée aux postes individuels, où un seul opérateur effectue une tâche. Bien qu'il s'agisse là d'un cas fréquent dans des applications réelles, on doit envisager son extension aux situations où plusieurs opérateurs coopèrent à l'atteinte des divers buts d'opération. Par ailleurs, il est important de réaliser que l'interface informatisée n'est qu'une des sources d'interaction à la disposition de l'opérateur. Dans certains cas, cette interface informatisée ne compte d'ailleurs que pour une partie des échanges de ce dernier avec son environnement (de Keyser, 1987), les autres moyens incluant les communications verbales avec les autres opérateurs, la vue physique sur les installations, et les autres informations sensorielles (bruits, odeurs, vibrations du plancher).

De plus, une validation en laboratoire est toujours limitée à cause des conditions environnantes qui prévalent, lesquelles sont presque toujours différentes de celles de la situation « normale ». Par exemple, lors des expérimentations, il n'y avait pas de risque pour les sujets ou pour d'autre personnel suite aux décisions d'opération. De plus, les

mesures fournies aux sujets n'étaient pas entachées de bruit; ce bruit est pourtant fréquent lors du travail réel. Une des tâches de l'opérateur est d'ailleurs d'évaluer le degré de fiabilité des sources d'informations qu'il utilise. Enfin, des considérations de temps, de coût et de disponibilité ont aussi limité l'ampleur du processus qui a été utilisé et le nombre de sujets à qui on a fait appel lors des validations.

8.2 Contributions à l'avancement de la connaissance

Cette recherche a apporté plusieurs contributions à l'avancement de la connaissance dans le domaine de la conception d'interfaces humains-machines pour des processus complexes. Ces contributions sont les suivantes:

- L'adaptation de tâches génériques de conduite de processus, telles que proposées originalement par Rouse, à la conception d'interfaces humains-machines et l'identification des types d'informations requis pour en soutenir l'exécution.
- L'identification des liens entre les tâches génériques de conduite et des modèles techniques du processus (fonctionnel, causal et structurel), et l'exploitation de ces derniers pour fournir les informations nécessaires à l'exécution de ces tâches.
- L'élaboration et la validation, pour des situations normales et certains cas incidentels, d'une architecture d'interface humain-machine basée sur ces tâches génériques et leurs liens avec les modèles techniques du processus. Cette architecture est inédite et ouvre la porte à l'élaboration d'interfaces qui soutiendront une meilleure performance et qui pourront être réalisées, et donc vérifiées, de façon plus systématique que ce qui est fait traditionnellement.
- L'élaboration d'un canevas[27] d'IHM spécialisé pour des applications à la conduite de processus complexes. Alors que l'utilisation de canevas est en train de s'imposer pour la conception de logiciel, des auteurs ont tenté d'appliquer cette approche à la

[27] Traduit de l'anglais « Design Patterns ».

conception d'interfaces humains-machines avec l'objectif d'en améliorer la qualité et la rapidité de conception (Granlund et Lafrenière, 1999). Toutefois, les canevas d'IHM existants sont d'une portée très limitée (p. ex., assistants, boîtes de dialogue spécialisées); Tagci constitue alors une extension très importante de la portée des canevas existants. Cette contribution n'avait pas été anticipée au début de la recherche, mais elle apparaît comme une des retombées les plus intéressantes des travaux qui ont été effectués.

D'autres contributions, de moindre envergure, ont aussi été apportées à l'état de la connaissance. Ainsi, on a pu:

- Compléter des résultats obtenus par d'autres auteurs ayant étudié la conduite de ce type de processus (Crossman et Cooke, 1974; Moray et al., 1986). Notre contribution est la suivante:
  - Démonstration de la diminution de la charge mentale de travail des sujets lors de l'acquisition d'expertise durant la conduite en situations normales (voir la section 5.3.5), et mise en évidence d'une corrélation entre les niveaux de charge mentale ressentie au cours d'essais successifs (voir la section 5.3.1).
  - Mise en évidence de plusieurs corrélations entre des variables liées à la performance des sujets telles que les niveaux de production et le nombre de commandes utilisées (voir la section 5.3.1).
- Démontrer comment la présence d'un support procédural lors de tâches de transition sur un processus complexe entraîne une stabilisation du comportement de l'opérateur.
- Montrer qu'une présentation « en parallèle » de toutes les informations disponibles était insuffisante pour détecter des pannes, alors qu'une présentation, même plus segmentée mais appuyée par l'utilisation d'un modèle fonctionnel, était supérieure.

8.3 *Pistes de recherche à explorer*

Cette section présente plusieurs pistes de recherche pouvant être identifiées à partir des travaux présentés ici.

8.3.1 Améliorations à apporter à la méthode

On peut identifier plusieurs améliorations à apporter à la méthode, dont chacune peut constituer une piste de recherche:

- Validations expérimentales pour un processus de plus grande envergure avec des effectifs plus considérables sur une période de temps plus étendue (plusieurs semaines), et utilisant plusieurs scénarios d'incidents et diverses approches de formation. De pair avec ces validations, on devrait aussi intégrer à Tagci des modifications pour améliorer le soutien aux tâches de transition de façon à obtenir une meilleure productivité qu'une IHM conventionnelle. Ces modifications pourraient comprendre des optimisations aux procédures de conduite ainsi qu'un dispositif permettant de rendre disponible une trace des réglages utilisés lors de manoeuvres pour aider les sujets à estimer les réglages pour les essais subséquents (tel qu'indiqué à la section 5.3.6). Ces validations expérimentales permettraient, entre autres, de confirmer les résultats déjà obtenus et d'identifier des éléments importants à inclure dans un programme de formation.

- Prise en compte explicite de l'horizon temporel de la tâche, comme on l'a mentionné à la section 7.1.

- Raffinement des éléments de l'architecture et de l'identification des informations requises pour soutenir les tâches génériques. L'architecture proposée repose sur des tâches assez grossières; de plus, on n'a pas établi de liens formels entre les éléments de l'architecture et les principes ou lignes directrices ergonomiques disponibles. On pourrait donc réaliser une extension très intéressante à la recherche en élaborant un environnement de développement d'IHM qui s'appuierait sur l'architecture proposée

et qui permettrait au concepteur d'intégrer de façon quasi-automatique les résultats des connaissances ergonomiques disponibles aux éléments composant l'interface en voie d'élaboration.

- Interfaces distribuées et interfaces multi-opérateurs. Comme on l'a mentionné, la méthode s'adresse actuellement à des situations relativement simples. Les problèmes posés soit par la conception d'interfaces mono-opérateurs mais distribuées spatialement ou encore par la conception d'interfaces multi-opérateurs n'ont pas encore été traités.

8.3.2 Formation et sélection

Plusieurs auteurs ont cherché à identifier les types de connaissances que la formation des opérateurs devrait fournir; par exemple, devrait-on enseigner des notions sur les principes physico-chimiques du processus, ou encore traiter des procédures permettant de l'opérer? Les résultats disponibles ne permettent pas de répondre à cette question (p. ex., voir l'étude expérimentale très complète, bien qu'ancienne, de Morris et Rouse, 1985; une discussion plus récente est aussi disponible dans Bainbridge, 1998). Toutefois, la recherche effectuée ici propose un nouveau point de vue et offre, par la ré-utilisation de l'architecture générique proposée, un cadre permettant d'intégrer les résultats existants relatifs à la formation et de tester des hypothèses. De plus, les observations déjà relatées (voir le Chapitre 7:) suggèrent de nouveaux éléments quant aux types de connaissances qui pourraient être évalués pour leur inclusion éventuelle dans la formation des opérateurs. Des résultats concluants dans ce domaine seraient utiles pour l'industrie en permettant d'améliorer la formation des opérateurs.

Une autre piste reliée à la formation et présentant des applications pratiques importantes concerne la sélection des opérateurs, à partir de la prédiction de leur performance sur la

base des résultats obtenus lors de tâches simulées sur un processus complexe servant d'étalon.

8.3.3 Architecture de systèmes humains-machines

On peut aussi envisager une extension à la portée de la méthode en utilisant le concept des « blocs de construction élémentaires» employé dans les approches modernes en ingénierie systémique (Martin, 2000). Suivant cette approche, un système arbitraire peut être décrit comme un assemblage de blocs élémentaires dont la réalisation capture l'ensemble des considérations pertinentes à sa conception, à son développement et à sa mise au rancart. La figure suivante montre un tel bloc élémentaire:

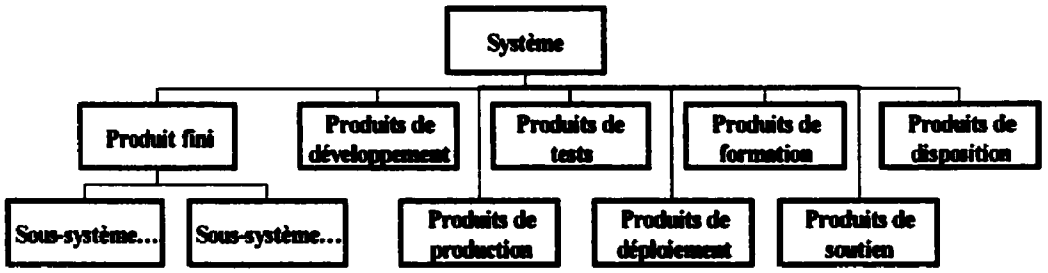


Figure 8-1: Description d'un bloc élémentaire.

La figure montre que tous les aspects du cycle de vie d'un système s'appuient sur l'utilisation de produits finis (qui y sont intégrés), de produits qui devront être développés et testés, de produits servant à la formation (p. ex., outils, matériel pédagogique, programmes), etc.; l'ensemble de ces éléments constituent un bloc élémentaire. On pourrait ainsi définir une IHM de grande envergure (p. ex., une IHM destinée à plusieurs opérateurs dans un complexe industriel, sur un navire) sous forme de tels blocs élémentaires. Ceci conduirait à une méta-architecture d'IHM qui inclurait non seulement les composants de l'IHM proprement dite, mais aussi les activités de soutien requises pour sa conception, son déploiement (p. ex., formation), son évolution et sa mise au rancart.

8.3.4 Composants d'interfaces humains-machines

En dépit de l'abondance de lignes directrices et de principes de conception (tel qu'illustré à la section 4.2), il reste encore beaucoup à faire pour réaliser des images de bonne qualité en vue de faciliter à l'utilisateur l'extraction d'informations utiles et la manipulation de cette information. Comme exemples de questions non résolues qui ont été mises en évidence lors de cette recherche, on peut mentionner:

- La représentation de modèles causaux de grande taille associés aux processus de grande envergure. Quelques travaux ont porté sur l'influence du nombre de composants et d'interconnections dans des circuits électroniques sur la performance du personnel de maintenance (Wohl, 1982; Wohl, 1983); toutefois, il y a eu, à notre connaissance, très peu de recherche effectuée pour déterminer quelles sont les limites, en termes de traitement humain de l'information, à l'exploitation de modèles causaux, que ce soit pour soutenir l'élaboration de plans ou pour identifier la cause de phénomènes (p. ex., pannes) dans le processus.

- La conception de procédures intégrées dans les interfaces, et en particulier leur lien avec les éléments servant à implanter les commandes associées aux consignes et le niveau de guidage requis pour les types de tâches et d'opérateurs.

- La représentation des relations temporelles entre les variables; cet aspect est considéré comme très important en contrôle de processus et est susceptible d'améliorer considérablement la qualité des interfaces produites.

Bien entendu, des questions plus classiques comme la navigation entre les divers éléments composant une interface ainsi que les mérites comparatifs des différentes techniques de gestion des alarmes restent posées et continuent de représenter des thèmes de recherche importants.

CHAPITRE 9: RÉFÉRENCES

ALENGRY, P. (1989). Analyse du travail de pilotage d'une centrale nucléaire (II): les classes de situation. Rapport INRIA, no. 1007.

ALENGRY, P. (1988). Représentation des modes opératoires et des connaissances évoquées par des opérateurs de centrale nucléaire dans une tâche de pilotage simulé. Rapport INRIA (sans numéro).

AMALBERTI, R., DEBLON, F. (1992). Cognitive Modelling of Fighter Aircraft Process Control: A Step Towards an Intelligent On-Board Assistance System. International Journal of Man-Machine Studies. 36. 639-671.

AMALBERTI, R., HOC, J.-M. (1998). Analyse des activités cognitives en situation dynamique: pour quels buts? Comment?. Le Travail humain. 61(3). 209-234.

BAINBRIDGE, L. (1991). Multiplexed VDT Display Systems: Problems in the Design of Multi-Format Display Systems for Complex Tasks. In Weir, G.R.S. and Alty, J.L. (eds.) Human-Computer Interaction and Complex Systems. Academic Press, London. 189-210.

BAINBRIDGE, L. (1998). Difficulties and Errors in Complex Dynamic Tasks. http://www.bainbrdg.demon.co.uk/Papers/CogDiffErr.html.

BARON, S., KRUSER, D.S., HUEY, B.M. (Eds.). (1990). Approaches to Human Performance Modelling. Chap. 2 in Quantitative Modeling of Human Performance in Complex, Dynamic Systems, prepared for the National Academy of Sciences. National Academy Press.

BEARE, A.N., GADDY, C.D., TAYLOR, J.C. (1991). Human Factors Guidelines for Fossil Power Plant Control Rooms and Remote Control Stations. Final Report, EPRI Research Project 2710-20. General Physics Corporation.

BROWN, D.C. (1999a). Alarm Management: A Problem Worth Taking Seriously I. www.controlmagazine.com/archives/0799/alarm_management.htm.

BROWN, D.C. (1999b). Alarm Management: A Problem Worth Taking Seriously II. www.controlmagazine.com/archives/0899/0899_alarm_mgmt_feature3.htm.

BURNS, C.M., VICENTE, K.J., CHRISTOFFERSEN, K., PAWLAK, W.S. (1997). Towards viable, useful and usable human factors design guidance. Applied Ergonomics. 28 (5-6). 311-322.

BYTHEWAY, C.W. (1992). Fast – An Intuitive Thinking Approach. Proceedings of SAVE 1992. 229-231.

CACCIABUE, P. C., MANCINI, G., BERSINI, U. (1990). A Model of Operator Behaviour for Man-Machine System Simulation. Automatica. 26 (6). 1025-1034.

CHANDRASEKARAN, B., BHATNAGAR, R., SHARMA, D.D. (1991). Real-Time Disturbance Control. Communications of the ACM. 34 (8). 32-47.

CHAPANIS, A. (1996). Human Factors in Systems Engineering. Wiley Series in Systems Engineering, John Wiley & Sons, Inc.

CHRISTOFFERSEN, K., HUNTER, C.N., VICENTE, K.J. (1996). A longitudinal Study of the Effects of Ecological Interface Design on Skill Acquisition. Human Factors. 38 (3). 523-541.

COCHRAN, E., BULLEMER, P. (1996). Abnormal Situation Management: Not by New Technology Alone. Proceedings of the AIChe Process Plant Safety Symposium, Houston, Texas. 218-223

COLQUHOUN, R. (1984). Development of Symptoms-Based Operating Procedures. Nuclear Safety. 25 (3).

CORCORAN, W.R., PORTER, N.J., CHURCH, J.F., CROSS, M.T., GUINN, W.M. (1981). The Critical Safety Functions and Plant Operation. Nuclear Technology. 55.

CROSSMAN, E.R.F.W., COOKE, J.E. (1974). Manual control of Slow-Response Systems. In The Human Operator in Process Control, Edwards, E., Lees, F.P. (Eds). Taylor & Francis Ltd, London.

DEPARTMENT OF DEFENSE. (1996). Design Criteria Standard MIL-STD-1472E – Human Engineering. United-States of America.

DIEN, Y., MONTMAYEUL, R., BOZEC, J., LAMARRE, J.C. (1991). (1991). Conception des consignes de conduite de processus continu pour postes de travail informatisés. Revue Générale Électrique. 5. 32-35.

DINADIS, N., VICENTE, K.J. (1996). Ecological Interface Design for a Power Plant Feedwater Subsystem. IEEE Transactions on Nuclear Science. 43 (1).

ENDSLEY, M.R. (1995). Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems ». Human Factors. 37 (1).

FANCHINI, H. (1991). Imageries de conduite industrielle: le choix des images, le poids des maux. Le Travail humain. 54 (3). 267-281.

FERGUSON, G.A., TAKANE, Y. (1989). Statistical Analysis in Psychology and Education. McGraw-Hill Book Company.

FISET, J.-Y. (1995). A Generic Task Framework for Interface Analysis and Design in Process Control ». Pre-print of 6th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Man-Machine Systems. MIT, Cambridge. 445-450.

FLIN, R., SLAVEN, G., STEWART, K. (1996). Emergency Decision Making in the Offshore Oil and Gas Industry. Human Factors. 38(2). 262-277.

GADDY, C.D., TAYLOR, J.C., BEARE, A.N., HUMPHREY, M.D., CHRISTIANSEN, E.C., BLANCO, M.A. (1993). Transfer of Human Factors Lessons Learned from Fossil Power Plant Advanced Control Displays to Nuclear Power Plant Applications. Transactions of the American Nuclear Society Topical Meeting: Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Man-Machine Interface Technologies. 209-214.

GAMBIEZ, F., KOLSKI, C., TANG, X., MILLOT, P. (1991). Man-Machine Interface for Predex, an Expert System Shell for Process Control and Supervision. In Decision Support Systems and Qualitative Reasoning. M.G. Singh and L. Travé-Massuyès (Éds.). Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland). 341-346.

GILMORE, W.E., GERTMAN, D.I., BLACKMAN, H.S. (1989). The User-Computer Interface in Process Control – A Human Factors Engineering Handbook. Academic Press.

GRANDLUN, ÅSA, LAFRENIÈRE, DANIEL, (1999). PSA – A Pattern-Supported Approach to the User Interface Design Process. 2nd draft. www.gespro.com/lafrenid/PSA.pdf.

HENNINGSEN, A., KEMMERER, J.P. (1995). Intelligent Alarm Handling in Cement Plants. IEEE Industry Applications Magazine. 9-15.

HILL, S.G., IAVECCHIA, H.P., BYERS, J.C., BITTNER, A.C., ZAKLAD, A.L., CHRIST, R.E. (1992). Comparison of Four Subjective Workload Rating Scales. Human Factors. 34 (4). 429-439.

HOC, J.-M. (1991). Effets de l'Expertise des Opérateurs et de la Complexité de la Situation dans la Conduite d'un Processus Continu à Long Délai de Réponse: Le Haut Fourneau. Le Travail humain. 54 (3). 225-249.

HOONHOUT, H.C.M., ZWAGA, H.J.G. (1993). Operator Behavior and Supervisory Control Systems in the Chemical Process Industry. Proceedings of the 5th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International '93). 109-114.

HUTTON, R.J.B., KLEIN, G. (1999). Expert Decision Making. Systems Engineering. 2 (1). 32-45.

IEEE. (1988). 1023 - Guide for the Application of Human Factors Engineering to Systems, Equipment, and Facilities of Nuclear Power Generating Stations. Institute of Electrical and Electronics Engineers. www.standards.ieee.org/reading/ieee/std_public/description/nuclear/1023-1988_desc.html.

ISO. (1999). 13407 - Human-centred design processes for interactive systems. International Organization for Standardization. www.iso.ch/cate/d21197.html.

JOHNSON, D. (1997). Getting the Message Across. Control Engineering Online. www.manufacturing.net/magazine/ce/archives/1997.

JONES, P.E.R., FISET, J.-Y., LUPTON, L.R. (1993). CANDU Operator Decision Support Systems: Lessons Learned and Future Directions. Paper presented at the International Atomic Energy Agency's Specialists Meeting. 1-14.

DE KEYSER, V. (1987). How can computer-based visual displays aid operators?. International Journal of Man-Machine Studies. 27. 471-478.

KIERAS, D., BOVAIR, S. (1984). The role of a mental model in learning to operate a device. Cognitive Science. 8. 255-273.

KIERAS, D. (1992). Diagrammatic Displays for Engineered Systems: Effects on Human Performance in Interacting with Malfunctioning Systems. International Journal on Man-Machine Studies. 36. 861-895.

KLEIN, G.A., CALDERWOOD, R. (1991). Decision Models: Some Lessons From the Field. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 21 (5). 1018-1026.

KNAEUPER, A.E. (1983). A model of human problem solving in dynamic environments. Report no. 83-3, Center for Man-Machine Systems Research, Georgia Institute of Technology.

KOLSKI, C. (1997). Interfaces homme-machine - application aux systèmes industriels complexes, 2e édition revue et augmentée, Hermes, - collection informatique.

KONTOGIANNIS, T., EMBREY, D. (1997). A User-Centred Design Approach for Introducing Computer-Based Process Information Systems. Applied Ergonomics. 28 (2). 109-119.

LANDERWEERD, J. A. (1979). Internal Representation of a Process, Fault Diagnosis and Fault Correction. Ergonomics. 22 (12). 1343-1351.

LENNARTSON, B., TITTUS, M., EGARDT, B., PETTERSSON, S. (1996). Hybrid Systems in Process Control. Control Systems. 16 (5). 45-56.

LIND, M. (1990). Representing Goals and Functions of Complex Systems – An Introduction to Multilevel Flow Modelling. Technical Report no. 90-D-381from the Technical University of Denmark.

MARTIN, J.N. (2000). Processes for Engineering a System: An Overview of the ANSI/EIA 632 Standard and its Heritage. Systems Engineering. 3 (1). 1-26.

MESHKATI, N. (1991). Human factors in Large-Scale Technological Systems' Accidents: Three Mile Island, Bhopal, Chernobyl. Industrial Crisis Quarterly. 5. 133-154.

MITCHELL, C. M., MILLER, R. A. (1986). A discrete Control Model of Operator Function: A Methodology for Information Display Design. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. SMC-16 (3). 343-357.

MITCHELL, C.M., SAISI, D.L. (1987). Use of Model-Based Qualitative Icons and Adaptive Windows in Workstations for Supervisory Control Systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. SMC-17 (4). 573-593.

MODARRES, M., CADMAN, T. (1986). A Method fo Alarm System Analysis for Process Plants. Computers & Chemical Engineering. 10 (6). 557-565.

MORAY, N., LOOTSTEEN, P., PAJAK, J. (1986). The Acquisition of Process Control Skills. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. SMC-16 (4). 497-504.

MORRIS, N. M., ROUSE, W. B. (1985). The Effects of Type of Knowledge upon Human Problem Solving in a Process Control Task. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. SMC-15 (6). 698-707.

MORRISON, D.L., UPTON, D.M. (1994). Fault Diagnosis and Computer Integrated Manufacturing Systems. IEEE Transactions on Engineering Management. 40 (4). http://www.people.hbs.edu/dupton/papers/troubleshoot/WorkingPaper.html.

NASA.(1996). User Interface Guidelines. Report prepared for the Data Systems Technology Division/Code 520, Goddard Space Flight Center by CTA INCORPORATED SEAS Subcontract 033336.

NEBOIT, M., GUILLERMAIN, H., FADIER, E. (1990). De l'analyse du système à l'analyse de l'interaction opérateur-tâche: proposition méthodologique. Chap. 10 in Les Facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes. Éditions Octares Entreprises.

NORDVIK, J.-P., MITCHISON, N., WILIKENS, M. (1994). The Role of the Goal Tree-Success Tree Model in the Real-Time Supervision of Hazardous Plants. Reliability Engineering and System Safety. 44. 345-360.

PAWLAK, W. S., AND VICENTE, K. J. (1994). Ecological Interface Design: Shaping Effective Operator Control?. Proceedings of the 12th Triennial Congress of the International Ergonomics Association. 4. 387-389.

PEDERSEN, C.R., LIND, M. (1997). Conceptual Design of Industrial Process Displays. http://www.sevent.dk/industrial.htm.

PENNINGS, R., SAUSSAIS, Y. (1993). Formentor: Real-Time Safety Oriented Decision Support Using a Goal Tree-Success Tree Model for the ISO-Satellite Application. Proceedings of the 13th International Conference on Artificial Intelligence – Avignon '93.

PENNINGS, R., PONAMALE, M., GERLINGER, G. (1996). A Methodology for the Construction of Safety-Oriented Advisory Systems for Operators. International Journal Of Industrial Ergonomics. 17 (4). 367-374.

POTTER, S.S., WOODS, D.S. (1991). Event Driven Timeline Displays : Beyond Message Lists in Human-Intelligent System Interaction. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 1283-1288.

POTTER, S. S., WOODS, D. D., HILL, T., BOYER, R. L., MORRIS, W. S. (1992). Visualization of Dynamic Processes: Function-Based Displays for Human-Intelligent Systems Interaction. Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics.

RASMUSSEN, J. (1985). The Role of Hierarchical Knowledge Representation in Decision-Making and System Management. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. SMC-15 (2). 234-244.

RASMUSSEN, J. (1983). Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. SMC-13. 257-266.

RASMUSSEN, J., VICENTE, K.J. (1989). Coping with Human Errors through System Design : Implications for Ecological Interface Design. International Journal of Man-Machine Studies. 31. 517-534.

REASON, J. (1986). Recurrent Errors in Process Environments : Some Implications for the Design of Intelligent Decision Support Systems. Intelligent Decision Support in Process Environments-NATO ASI Series, Vol. F21. Hollnagel, E. (Ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

ROTH, E. M., WOODS, D. D. (1988). Aiding Human Performance I: Cognitive Analysis. Le Travail humain. 51 (1). 39-64.

ROUSE, W. B. (1983). Models of Human Problem Solving: Detection, Diagnosis, and Compensation for System Failures. Automatica. 19 (6). 613-625.

SALAZAR-FERRER, P. (1995). Raisonnement Causal et Modélisation de l'Activité Cognitive d'Opérateurs de Chaufferie Nucléaire Navale. Thèse présentée à l'université de Provence en vue de l'obtention du Doctorat en Psychologie Cognitive.

SAMURÇAY, R., HOC, J.-M.. (1996). Causal Versus Topographical Support for Diagnosis in a Dynamic Situation. Le Travail humain. 59 (1). 45-68.

SANDERSON, P.M., VERHAGE, A.G., FULD, R.B. (1989). State-Space and Verbal Protocol Methods for Studying the Human Operator in Process Control. Ergonomics. 32 (11). 1343-1372.

SCHAAFSTAL, A. (1993). Knowledge and Strategies in Diagnostic Skill. Ergonomics. 36 (11).

SIEBERT, S., SICARD, Y., THEBAULT, M.-H. (1988). Comparaison d'interfaces de conduite – essais incidentels sur pupitre d'imageries graphiques. Le Travail humain. 51 (1). 81-95.

SIEBERT, S., SICARD, Y., THEBAULT, M.-H. (1989). Intelligent Interface Design Criteria. Proceedings of the IAEA/IWG NPPCI Specialists' Meeting on Artificial Intelligence in Nuclear Power Plants. 1. 95-106.

STANTON, N. A. (1994). Human Factors in Alarm Design. Taylor & Francis: London.

SUTTON, I. (1997). Writing Operaitng Procedures for Process Plants, Southwestern Books. Houston, Tx.

TAY, M. E. (1996). Keeping Tabs on Plant Energy and Mass Flows. Chemical Engineering. 82-88.

THURMAN, D.A. (1997). The Interactive Monitoring and Control (IMaC) Design Methodology: Application and empirical results. Proceedings of the 1997 Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society. 289-293.

VERMEULEN, J. (1987). Effects of Functionally or Topographically Presented Process Schemes on Operator Performance. Human Factors. 29 (4). 383-394.

VICENTE, K.J., CHRISTOFFERSEN, K., PEREKLITA, A. (1995). Supporting Operator Problem Solving Through Ecological Interface Design. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 25 (4). 529-545.

VICENTE, K. J. & CHRISTOPHERSEN, K. & HUNTER, C. N. (1996). A Longitudinal Study of the Effects of Ecological Interface Design on Skill Acquisition. Human Factors. 38(3). 523-541.

VICENTE, K. J., RASMUSSEN, J. (1992). Ecological Interface Design: Theoretical Foundations. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 22 (4). 589-606.

WEBER, T.W. (1988). An Introduction to Process Dynamics and Control. Robert E. Krieger Publishing Company, Fla., USA.

WIERINGA, D., MOORE, C., BARNES, V. (1998). Procedure Writing: Principles and Practices. Second ed. Columbus, OH: Batelle Press.

WIERWILLE, W.W., EGGEMEIER, F. (1993). Recommendations for Mental Workload Measurement in a Test and Evaluation Environment. Human Factors. 35 (2). 263-281.

WILIKENS, M., BURTON, C.J. (1996). Formentor: Real-Time Operator Advisory System for Loss Control. Applicaton to a Petro-Chemical Plant. International Journal of Industrial Ergonomics. 17. 351-366.

WOHL, J.G. (1982). Maintainability Prediction Revisited: Diagnostic Behavior, System Complexity and Repair Time. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 12 (3). 241-250.

WOHL, J.G. (1983). Cognitive Complexity Versus System Complexity in Electronic Maintenance. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 13 (4). 624-626.

WOODS, D. D., ROTH, E. M. (1988). Aiding Human Performance II: From Cognitive Analysis to Support Systems. Le Travail humain. 51 (2). 139-172.

XIAO, Y., MILGRAM, P.,DOYLE, D.J. (1992). Off-Loading, Prevention and Preparation: Planning Behaviors in Complex Systems Management. Proceedings of the 25th Annual Conference of the Human Factors Association of Canada.

YU, C. H., BEHRENS, J. T. (1995). The Alignment Framework for Data Visualization: Relationships Among Research Goals, Data Types, and Multivariate Visualization Techniques. http://seamonkey.ed.asu.edu/~alex/alignment/alignment.html.

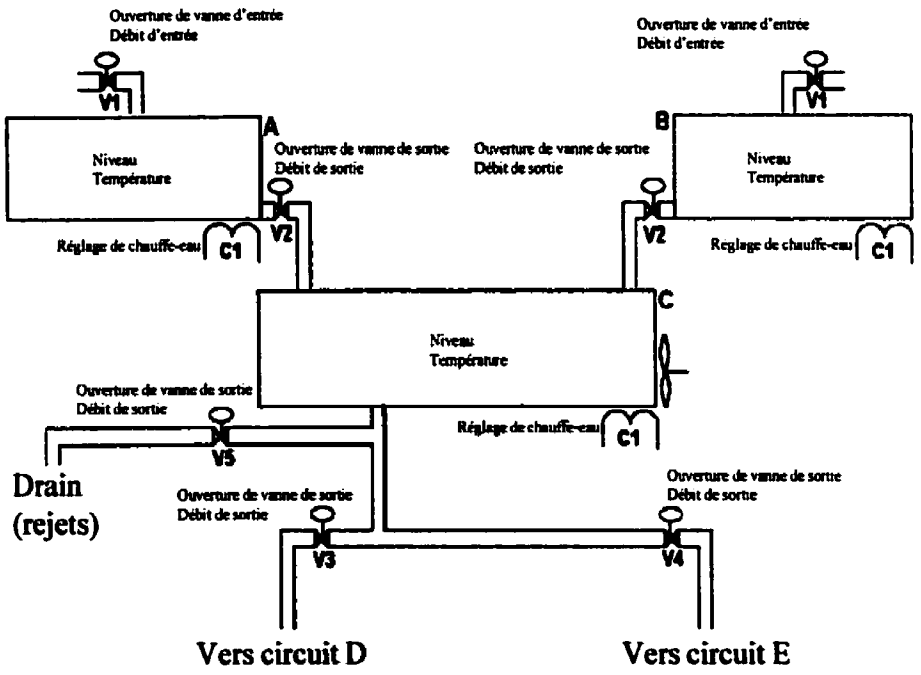
ZWAGA, H.J.G., HOONHOUT, H.C.M. (1994). Supervisory Control Behaviour and the Implementation of Alarms in Process Control. Human Factors in Alarm Design. Stanton, N. (Ed.). Taylor & Francis Ltd.

ANNEXE A: DOCUMENTS DE FORMATION

Cette annexe contient les documents de formation utilisés pour chacun des groupes de sujets ayant exploité les interfaces 1 et 2. La dernière section de l'annexe contient aussi l'entente de confidentialité prise avec chacun des sujets.

Document de formation - interface traditionnelle (1)

Le système que vous contrôlerez vous permet de fabriquer une quantité maximale d'un produit chimique donné, à une température donnée et avec une proportion des ingrédients A et B prédéterminée. La figure suivante décrit le système.



Système utilisé dans les essais.

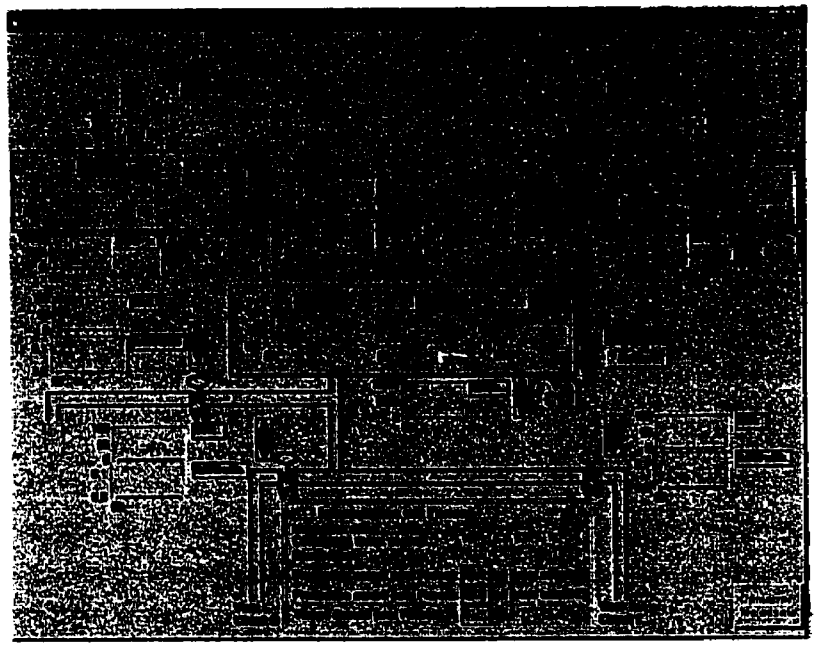
Le système comprend:

- Un réservoir A et un réservoir B contenant chacun un ingrédient liquide servant à fabriquer le produit final. Chaque réservoir comporte:

- une vanne d'alimentation V1 (ouverture: 0 à 100 %, avec une mesure du débit en m^3/s),
- une vanne d'évacuation V2 (ouverture: 0 à 100 %, avec une mesure du débit en m^3/s),
- un chauffe-eau C1 pour réchauffer le liquide (ouverture: 0-10000 W, avec une mesure de la puissance fournie au liquide en W),
- une mesure du niveau (niveau: 0-4 m),
- une mesure de la température (température: 0-30 C),
- un réservoir (C sur la figure) servant à mélanger les ingrédients à une température et dans une proportion données. Ce réservoir comporte:
    - deux vannes d'évacuation du produit fini vers les circuits D et E (ouverture: 0 à 100 %, avec une mesure du débit en m^3/s),
    - une vanne d'évacuation vers un drain pour disposer de produit excédentaire (ouverture: 0 à 100 %, avec une mesure du débit en m^3/s),
    - un chauffe-eau C1 permet de réchauffer le liquide (ouverture: 0-10000 W, avec une mesure de la puissance fournie au liquide en W)
    - un agitateur pour mélanger adéquatement les ingrédients pour produire le produit fini ; on dispose d'un bouton marche/arrêt et d'un indicateur de l'état du mélangeur.

Le système compte aussi deux vannes (ouverture: 0 à 100 %, avec une mesure du débit en m^3/s) vers des circuits de production (D et E sur la figure) où est acheminé le produit fini.

La figure suivante décrit l'interface-utilisateur du système informatique permettant de contrôler le système.



Interface du système informatique.

L'interface permet de contrôler le système comme suit:

- Un bouton « hausse-baisse » est situé à proximité de chacun des dispositifs de commande et permet d'en augmenter ou d'en diminuer la consigne d'ouverture.
- Chacune des valeurs mesurées du système est affichée de façon numérique et analogique sur un graphique de tendances. Toutes les valeurs et les états affichés sont des valeurs mesurées. Certaines des valeurs numériques affichées sont codées en couleur (Vert: situation normale, Jaune: la valeur s'approche d'une limite, Rouge: la valeur a atteint ou dépassé une limite).

L'interface permet aussi de surveiller les dispositifs de sûreté du système suivant:

- Les réservoirs A, B, et C ont les limites de niveau suivantes:
  - une limite d'avertissement de niveau presque maximal signale que le niveau est près du niveau maximal, et est indiquée par une ligne tiretée sur le graphique

de tendances du réservoir, et par un codage en jaune de la valeur numérique correspondante,

- une limite de niveau maximal est indiquée par une ligne tiretée sur le graphique de tendances du réservoir et par un codage en rouge de la valeur numérique correspondante. Si la limite de niveau maximal est atteinte, toutes les vannes d'alimentation du réservoir sont fermées automatiquement et ne pourront être ré-ouvertes que lorsque le niveau du réservoir sera redescendu sous la limite,
- une limite d'avertissement de niveau presque minimal signale que le niveau est près du niveau minimal, et est indiquée par une ligne tiretée sur le graphique de tendances du réservoir, et par un codage en jaune de la valeur numérique correspondante,
- une limite de niveau minimal est indiquée par une ligne tiretée sur le graphique de tendances du réservoir, et par un codage en rouge de la valeur numérique correspondante. Si la limite de niveau minimal est atteinte, toutes les vannes d'évacuation d'un réservoir donné sont fermées automatiquement, et le chauffe-eau est fermé ; les vannes ne pourront être ré-ouvertes et le chauffe-eau ré-allumé que lorsque le niveau du réservoir sera remonté au-dessus de la limite.

- Pour le réservoir C, l'agitateur ne peut être mis en marche que lorsque le niveau est au moins égal à la limite d'avertissement de niveau minimal. Si l'agitateur est en marche et que le niveau descend sous cette limite, l'agitateur est arrêté automatiquement et ne pourra être remis en marche que lorsque le niveau du réservoir sera remonté au-dessus de la limite.
- Quand des consignes de proportion et de température sont données par le système, les vannes vers les circuits D et E ne peuvent être ouvertes que lorsque la proportion et la température du mélange du réservoir C sont à l'intérieur des tolérances. Les valeurs numériques correspondantes sont codées en jaune à mi-chemin vers une

tolérance, et en rouge quand la tolérance est atteinte ou dépassée.

Toutes les données sont mises à jour à chaque seconde.

Consignes pour les essais:

Au cours de la séance qui suit, vous effectuerez 4 essais. **Il n'y aura pas de panne durant ces essais.** Pour chaque essai, le système sera initialisé à des valeurs de départ pour l'ouverture des vannes d'alimentation et d'évacuation des réservoirs A et B; de plus, les réservoirs A et B seront à mi-niveau. Pour chacun des essais, vous devrez viser les objectifs suivants:

Objectifs durant les essais
Atteindre les consignes de proportion (tolérance: ± 1 %) et de température (tolérance: ± 0,5 C)
Maximiser le débit vers le circuit D ou le circuit E, selon ce qui sera demandé
Maintenir les niveaux dans les réservoirs aussi stables et aussi près que possible de leur valeur mi-niveau (2 m), une fois que les autres objectifs ont été atteints.

Après 15 minutes, le système informatique arrêtera automatiquement l'essai et vous présentera un formulaire à l'écran qui vous demandera d'évaluer la charge de travail mentale à laquelle vous avez été soumis(e) durant l'essai. Pour évaluer la charge mentale, on vous présentera une échelle allant de 1 (charge mentale nulle) à 10 (charge mentale extrême) où vous indiquerez votre choix. Le formulaire vous communiquera aussi les consignes pour le prochain essai. La figure suivante montre le formulaire.

Consignes pour les essais:

Au cours de la séance qui suit, vous effectuerez 5 essais. **Il peut y avoir 0, 1, ou 2 pannes (simultanées) au cours de chaque essai.** Une panne consiste en une anomalie de l'équipement (ex.: vanne, chauffe-eau, tuyauterie) ou du processus (ex.: déviation d'une variable de processus).

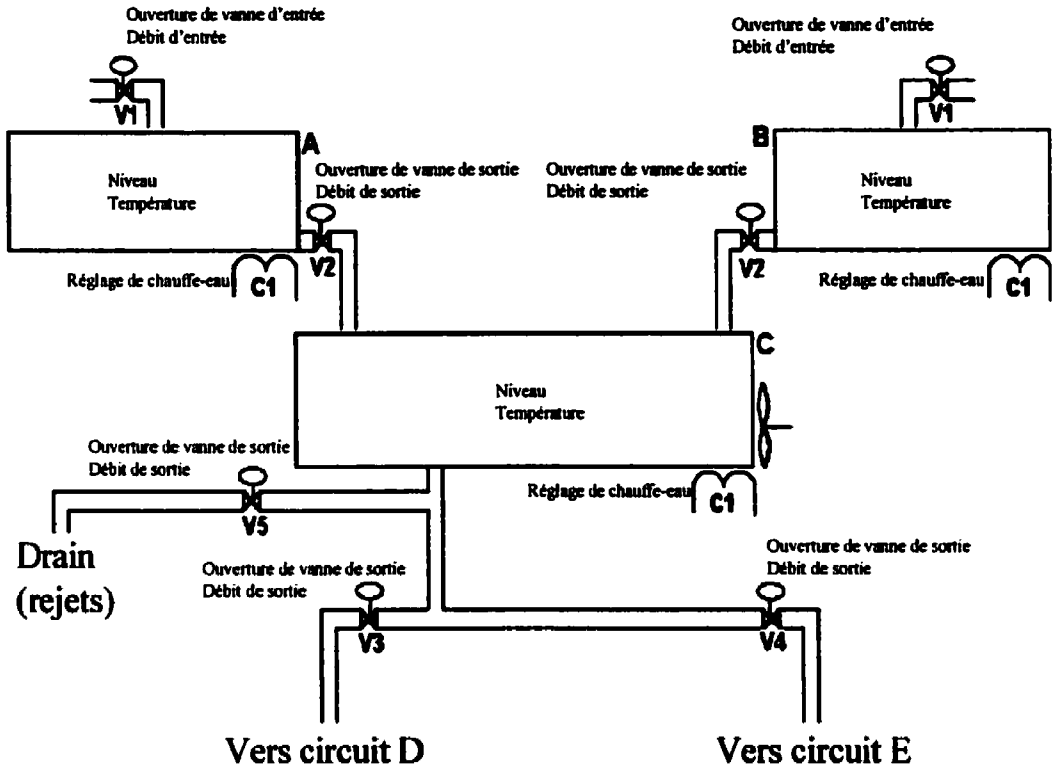
Comme pour les essais précédents, le système sera initialisé, pour chaque essai, à des valeurs de départ pour l'ouverture des vannes d'alimentation et d'évacuation des réservoirs A et B; de plus, les réservoirs A et B seront à mi-niveau. Pour chacun des essais, vous devrez viser les objectifs suivants:

Objectifs durant les essais
Atteindre les consignes de proportion (tolérance: ± 1 %) et de température (tolérance: ± 0,5 C) Maximiser le débit vers le circuit D ou le circuit E, selon ce qui sera demandé Maintenir les niveaux dans les réservoirs aussi stables et aussi près que possible de leur valeur mi-niveau (2 m.), une fois que les autres objectifs ont été atteints. En cas de panne: • Aviser l'analyste en disant « il y a une panne ». • Si vous pouvez en identifier la cause immédiatement, dire à l'analyste la cause de la panne. • Au besoin, prendre les mesures pour continuer d'atteindre les objectifs. • Quand le système est stabilisé, identifier la cause de la panne en verbalisant les étapes que vous franchissez pour rechercher la cause. Note: votre première priorité est de continuer d'atteindre les consignes de proportion, de température, et de maximiser le débit vers le circuit D (ou E, si demandé). La détection ou la recherche de la cause de la panne viennent en second lieu.

Après 15 minutes, le système informatique arrêtera automatiquement l'essai et vous présentera un formulaire à l'écran qui vous demandera d'évaluer la charge de travail mentale à laquelle vous avez été soumis(e) durant l'essai. Pour évaluer la charge mentale, on vous présentera une échelle allant de 1 (charge mentale nulle) à 10 (charge mentale extrême) où vous indiquerez votre choix. Le formulaire vous communiquera aussi les consignes pour le prochain essai.

Document de formation - interface améliorée

Le système que vous contrôlerez vous permet de fabriquer une quantité maximale d'un produit chimique donné, à une température donnée et avec une proportion des ingrédients A et B prédéterminée. La figure suivante décrit le système.



Système utilisé dans les essais.

Le système comprend:

- Un réservoir A et un réservoir B contenant chacun un ingrédient liquide servant à fabriquer le produit final. Chaque réservoir comporte:
  - une vanne d'alimentation V1 (ouverture: 0 à 100 %, avec une mesure du débit en m^3/s),
  - une vanne d'évacuation V2 (ouverture: 0 à 100 %, avec une mesure du débit en m^3/s),

- un chauffe-eau C1 pour réchauffer le liquide (ouverture: 0-10000 W, avec une mesure de la puissance fournie au liquide en W)
- une mesure du niveau (niveau: 0-4 m)
- une mesure de la température (température: 0-30 C)

- Un réservoir (C sur la figure) servant à mélanger les ingrédients à une température et dans une proportion données. Ce réservoir comporte:
  - deux vannes d'évacuation du produit fini vers les circuits D et E (ouverture: 0 à 100 %, avec une mesure du débit en m^3/s),
  - une vanne d'évacuation vers un drain pour disposer de produit excédentaire (ouverture: 0 à 100 %, avec une mesure du débit en m^3/s),
  - un chauffe-eau C1 permet de réchauffer le liquide (ouverture: 0-10000 W, avec une mesure de la puissance fournie au liquide en W)
  - un agitateur pour mélanger adéquatement les ingrédients pour produire le produit fini ; on dispose d'un bouton marche/arrêt et d'un indicateur de l'état du mélangeur.
- Le système compte aussi deux vannes (ouverture: 0 à 100 %, avec une mesure du débit en m^3/s) vers des circuits de production (D et E sur la figure) où est acheminé le produit fini.

L'interface-utilisateur permettant de contrôler le système est présentée à la figure suivante.

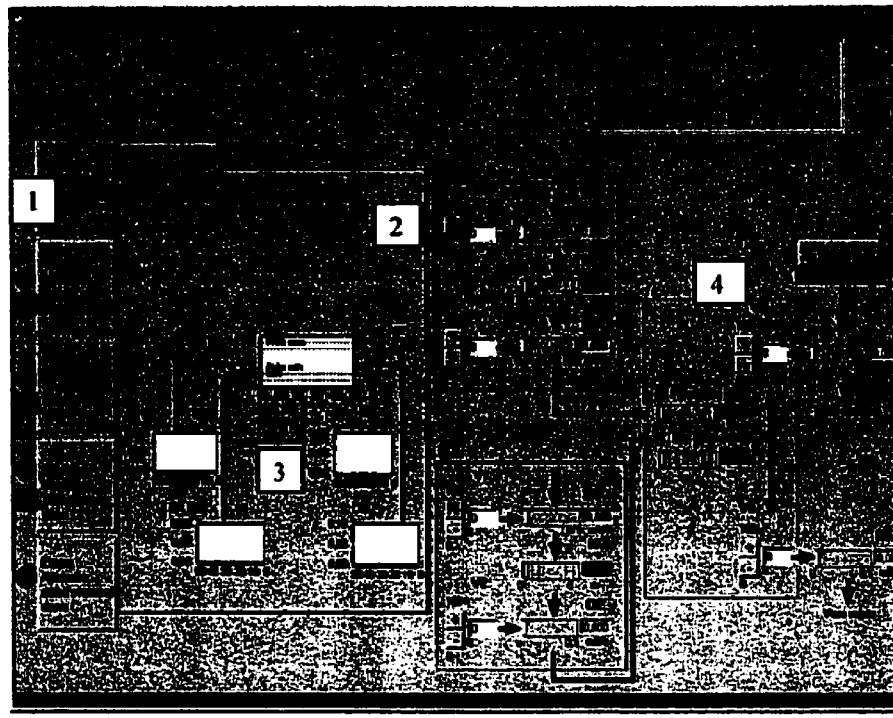


Image utilisateur.

L'interface permet de contrôler le système comme suit:

- La partie gauche de l'image contient une colonne de boutons (1) donnant accès aux étapes d'une procédure de conduite représentée sous forme de texte (2). Cette procédure guide l'utilisateur dans l'ordonnancement des étapes à franchir pour atteindre les consignes qui seront indiquées; elle est très efficace dans les situations normales de conduite, c.-à-d., les situations où il n'y a pas de pannes. À chaque étape de la procédure correspond, sur la partie droite de l'image, un diagramme d'une partie du système. Sur le diagramme, des boutons « hausse-baisse » situés à proximité des dispositifs de commande permettent d'en augmenter ou d'en diminuer l'ouverture.
- En plus de l'étape de la procédure de conduite, la partie gauche de l'image contient, pour chacun des objectifs à atteindre pour la conduite du système, une hiérarchie de variables reliées entre elles, le tout sous forme de graphiques de tendances (3). La variable située en haut de la hiérarchie est influencée par la variable située (et reliée)

au dessous, et celle-ci est elle-même influencée par les variables du dessous et qui lui sont reliées. La variable située en haut de la hiérarchie correspond aux objectifs qui vous seront communiqués ou aux dispositifs de sûreté du système. Cette information permet à l'utilisateur de connaître les relations entre les variables et les buts du système; elle est AUSSI utile dans les situations ANORMALES de conduite (p. ex., quand il y a des pannes) quand la Procédure Normale n'est pas utilisable.

- Quand vous positionnez votre curseur, au moyen de la souris, au dessus d'un bouton hausse-baisse, le système prédira l'influence (c.-à-d., tendra à faire augmenter ou à faire diminuer) de cette commande sur les variables du processus au moyen de flèches de couleur magenta.
- Chacune des valeurs mesurées du système est affichée de façon numérique. Toutes les valeurs et les états affichés sont des valeurs mesurées.

L'interface permet aussi de surveiller, au moyen d'indicateurs de couleur (vert: état OK, jaune: état marginal, rouge: état mauvais) l'atteinte des objectifs reliés aux consignes qui vous seront communiquées et des dispositifs de sûreté du système suivants. Les dispositifs de sûreté sont:

- Les réservoirs A, B, et C ont les limites de niveau suivantes:
  - une limite d'avertissement de niveau presque maximal signale que le niveau est près du niveau maximal; cette limite est indiquée par un fond jaune sur l'indicateur numérique correspondant et par une ligne tiretée sur les graphiques de tendances correspondants.
  - une limite de niveau maximal; cette limite est indiquée par un fond rouge sur l'indicateur numérique correspondant et par une ligne tiretée sur les graphiques de tendances correspondants. Si la limite de niveau maximal est atteinte, toutes les vannes d'alimentation du réservoir sont fermées

automatiquement et ne pourront être ré-ouvertes que lorsque le niveau du réservoir sera redescendu sous la limite,

- une limite d'avertissement de niveau presque minimal signale que le niveau est près du niveau minimal; cette limite est indiquée par un fond jaune sur l'indicateur numérique correspondant et par une ligne tiretée sur les graphiques de tendances correspondants.
- une limite de niveau minimal; cette limite est indiquée par un fond rouge sur l'indicateur numérique correspondant et par une ligne tiretée sur les graphiques de tendances correspondants. Si la limite de niveau minimal est atteinte, toutes les vannes d'évacuation d'un réservoir donné sont fermées automatiquement, et le chauffe-eau est fermé ; les vannes ne pourront être ré-ouvertes et le chauffe-eau ré-allumé que lorsque le niveau du réservoir sera remonté au-dessus de la limite.

- Pour le réservoir C, l'agitateur ne peut être mis en marche que lorsque le niveau est au moins égal à la limite d'avertissement de niveau minimal. Si l'agitateur est en marche et que le niveau descend sous cette limite, l'agitateur est arrêté automatiquement et ne pourra être remis en marche que lorsque le niveau du réservoir sera remonté au-dessus de la limite.
- Quand des consignes de proportion et de température sont données par le système, les vannes vers les circuits D et E ne peuvent être ouvertes que lorsque la proportion et la température du mélange sont à l'intérieur des tolérances.

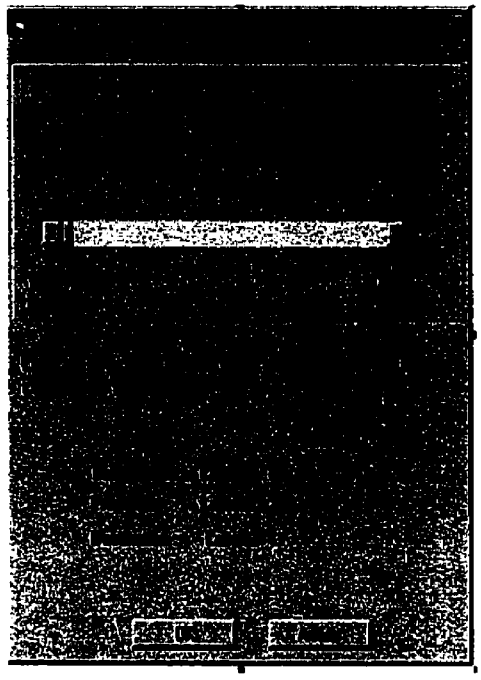
Consignes pour les essais:

Au cours de la séance qui suit, vous effectuerez 4 essais. **Il n'y aura pas de panne durant ces essais.** Pour chaque essai, le système sera initialisé à des valeurs de départ pour l'ouverture des vannes d'alimentation et d'évacuation des réservoirs A et B; de plus, les réservoirs A et B seront à mi-niveau. Pour chacun des essais, vous devrez viser les objectifs suivants:

Objectifs durant les essais
Atteindre les consignes de proportion (tolérance: ± 1 %) et de température (tolérance: ± 0,5 C)
Maximiser le débit vers le circuit D ou le circuit E, selon ce qui sera demandé.
Maintenir les niveaux dans les réservoirs aussi stables et aussi près que possible de leur valeur mi-niveau (2 m), une fois que les autres objectifs ont été atteints.

De plus, on vous demande d'utiliser la Procédure Normale, au moins au début des essais. Il vous est permis de ne pas utiliser la Procédure Normale de façon stricte lorsque vous serez à l'aise avec le fonctionnement du système.

Après 15 minutes, le système informatique arrêtera automatiquement l'essai et vous présentera un formulaire à l'écran qui vous demandera d'évaluer la charge de travail mentale à laquelle vous avez été soumis(e) durant l'essai. Pour évaluer la charge mentale, on vous présentera une échelle allant de 1 (charge mentale nulle) à 10 (charge mentale extrême) où vous indiquerez votre choix. Le formulaire vous communiquera aussi les consignes pour le prochain essai. La figure suivante montre le formulaire.



Consignes pour les essais:

Au cours de la séance qui suit, vous effectuerez 5 essais. Il peut y avoir OU ne pas y avoir de panne durant ces essais; si une panne se produit, il n'y en aura qu'une au cours de l'essai. En cas de panne, vous devez aviser l'analyste en disant « il y a une panne », et en identifier la cause si cela vous est possible. Note: votre priorité doit être de continuer de tenter d'atteindre les objectifs des essais.

Comme pour les essais précédents, le système sera initialisé, pour chaque essai, à des valeurs de départ pour l'ouverture des vannes d'alimentation et d'évacuation des réservoirs A et B ; de plus, les réservoirs A et B seront à mi-niveau. Pour chacun des essais, vous devrez viser les objectifs suivants:

Objectifs durant les essais
Atteindre les consignes de proportion (tolérance: ± 1 %) et de température (tolérance: ± 0,5 C) Maximiser le débit vers le circuit D ou le circuit E, selon ce qui sera demandé. Maintenir les niveaux dans les réservoirs aussi stables et aussi près que possible de leur valeur mi-niveau (2 m), une fois que les autres objectifs ont été atteints. En cas de panne: • Aviser l'analyste en disant « il y a une panne ». • Si vous pouvez en identifier la cause immédiatement, dire à l'analyste la cause de la panne. • Au besoin, prendre les mesures pour continuer d'atteindre les objectifs. • Quand le système est stabilisé, identifier la cause de la panne en verbalisant les étapes que vous franchissez pour rechercher la cause. Note: votre première priorité est de continuer d'atteindre les consignes de proportion, de température, et de maximiser le débit vers le circuit D (ou E, si demandé). La détection ou la recherche de la cause de la panne viennent en second lieu.

Entente de confidentialité

1- Les données qui seront recueillies au cours des essais auxquels vous participez le sont à des fins scientifiques. Je m'engage à préserver votre anonymat de façon à ce qu'il ne soit pas possible de faire un lien entre vous et les résultats que vous obtiendrez lors de ces essais.

2- Par ailleurs, comme le but de ces essais est de comparer la performance de groupes de sujets lors de l'exploitation de diverses interfaces humains-machines, il est impératif que vous ne discutiez pas des résultats que vous avez obtenu, des techniques ou des stratégies de contrôle ou de supervision du système que vous pourrez élaborer, ou de tout autre aspect des essais auxquels vous participerez. Vous vous engagez, sur l'honneur, à respecter la confidentialité de ces informations pour une durée de 6 mois après la signature de cette entente.

3- Enfin, vous serez rétribué(e) au taux de 6.75 $ l'heure pour votre participation à ces essais. De plus, pour chaque essai, un bonus de 0 à 50 % du taux horaire pour l'essai vous sera remis selon le tableau suivant:

Type d'essai	Production à atteindre durant un essai, en m^3, pour obtenir le bonus
I	200 m^3 pour obtenir le bonus maximum (50 % du taux horaire durant l'essai); si la production est inférieure à ce qui est indiqué, le bonus sera au pro-rata de la production.
II	100 m^3 pour obtenir le bonus maximum (50 % du taux horaire durant l'essai); si la production est inférieure à ce qui est indiqué, le bonus sera au pro-rata de la production.

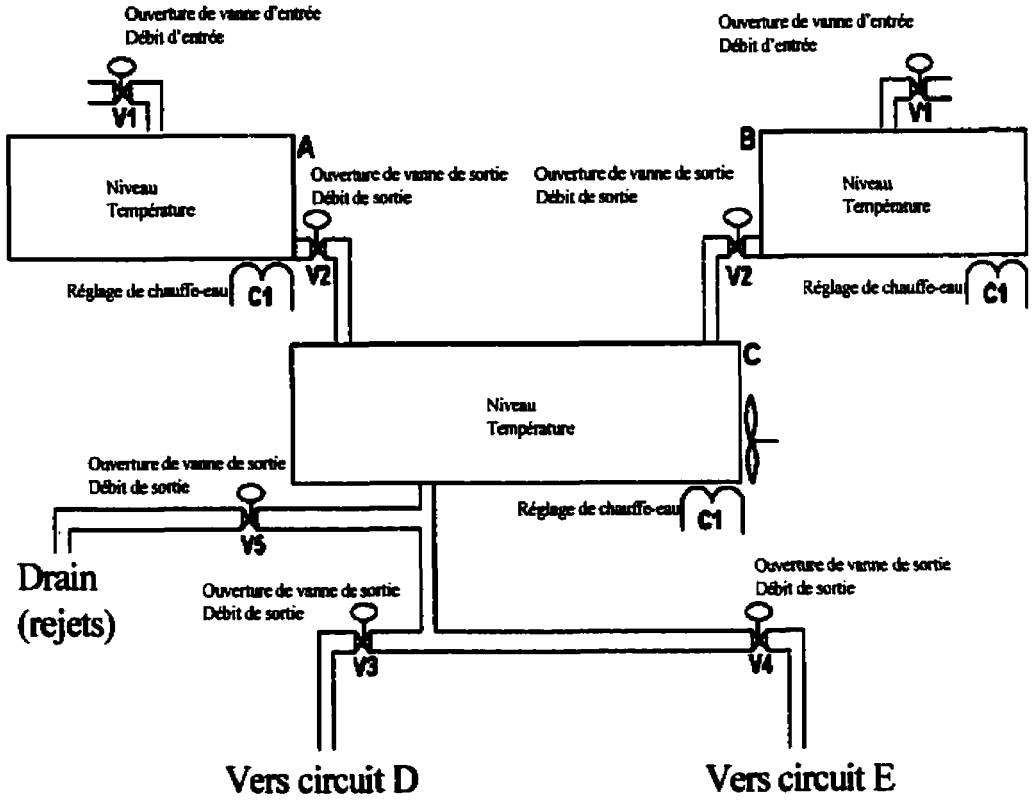
Cette rétribution vous sera versée à la condition expresse que vous complétiez tous les essais de l'expérimentation, qui seront programmés lors de 2 ou 3 sessions d'essai.

Accepté par: _____ Par: _____

Le: _____

ANNEXE B : MODÉLISATION DU PROCESSUS

Cette annexe décrit les variables, hypothèses et équations ayant servi à modéliser le processus. À titre de rappel, la figure suivante montre le processus.



Le tableau suivant montre les variables associées à chacun des réservoirs (A, B et C), leur valeur nominale ou leur plage de variation, et les unités utilisées. On identifie aussi des paramètres internes des réservoirs (en minuscules).

	Plages ou constantes pour les variables du réservoir		
Variables et unités	**A**	**B**	**C**
T1, température, débit d'alimentation, °C	0-50	0-50	-
V1, ouverture, vanne d'alimentation, %	0-100	0-100	-
D1, débit, alimentation, m^3/s	0-0.1	0-0.1	-
d_v1, délai entre la commande d'ouverture de la vanne 1 et le changement de débit d'alimentation, s	5	5	-
T2, température du débit d'évacuation (hypothèse: même température que celle du liquide dans le réservoir), °C	-	-	-
Ouverture, vannes d'évacuation, %	0-100	0-100	0-100
d_v1, délai entre la commande d'ouverture de la vanne 2 et le changement de débit d'évacuation, s	5	5	-
N, niveau, réservoir, m	0-4	0-4	0-4
S, surface, réservoir, m^2	3	4	4
C, puissance thermique utilisée pour chauffer le réservoir, Watts	0-10 000	0-10 000	0-10 000

Les valeurs limites pour certaines des variables (p. ex., niveaux minimum et maximum) sont indiquées dans les documents de formation montrés à l'Annexe A.

Modélisation

On pose les hypothèses simplificatrices suivantes:

- On peut modéliser de façon satisfaisante le processus sous forme d'équations du premier ordre[28].
- Les vannes sont linéaires, c.-à-d., une variation de 1 % dans l'ouverture de la vanne entraîne une variation de 1 % du débit, pour une pression donnée.
- Le processus est simulé de façon discrète, et l'intervalle temporel est unitaire. Ainsi, $dX/dt \rightarrow X_t - X_{t-1}$.
- Les réservoirs sont bien isolés, et les pertes thermiques sont négligeables.
- La pression exercée à la surface du liquide est constante (les réservoirs ne sont pas pressurisés).

---

[28] Pour l'élaboration de la simulation numérique, on a utilisé comme référence principale l'ouvrage suivant: Weber, T.W. (1988). An Introduction to Process Dynamics and Control. Robert E. Krieger Publishing Company, Fla, USA.

On traite d'abord des transferts de masse dans les réservoirs.

Transferts de masse, réservoirs A et B:

L'équation reliant les débits d'entrée, de sortie, et les changements de niveau dans chaque réservoir est:

$$(D1_t - D2_t) * I = S * (N_t - N_{t-1})$$

avec

$D1_t = (V1_t / 100)$, pour une pression d'entrée donnée

$D2_t = Cv2 * (V2_t / 100) * \sqrt{Nt}$

où:
- I: intervalle de la simulation (1 seconde)
- $D1_t$: débit d'entrée au temps t, m^3/s,
- $D2_t$: débit de sortie au temps t, m^3/s,
- S: surface du réservoir, m^2
- $V1_t$: ouverture de la vanne d'entrée au temps t, %
- $V2_t$: ouverture de la vanne de sortie au temps t, %
- N_t: niveau dans le réservoir au temps t, m
- N_{t-1}: niveau dans le réservoir au temps t-1, m
- Cv1: coefficient de la vanne d'entrée[29], $m^3/\%$,
- Cv2: coefficient de la vanne de sortie, $m^3/\%$,

Transferts de masse, réservoir C:

L'équation reliant les débits d'entrée, de sortie, et les changements de niveau dans le réservoir est:

$$(D2_t \text{ (réservoir A)} + D2_t \text{ (réservoir B)} - D3_t - D4_t - D5_t) * I = S * (N_t - N_{t-1})$$

avec

$D3_t = Cv3 * (V3_t / 100) * \sqrt{Nt}$

---

[29] Les coefficients des vannes sont des caractéristiques propres aux vannes. Pour ce système, on a réglé ces coefficients à: coefficient = débit maximal de la vanne / ouverture maximale de la vanne.

$D4_t = Cv4 * (V4_t / 100) * \sqrt{Nt}$

$D5_t = Cv5 * (V5_t / 100) * \sqrt{Nt}$

où: $D3_t$: débit de sortie au temps t (vers réservoir D)

$D4_t$: débit de sortie au temps t (vers réservoir E)

$D5_t$: débit de sortie au temps t (vers rejets)

Cv3: coefficient de la vanne de sortie

Cv4: coefficient de la vanne de sortie

Cv5: coefficient de la vanne de sortie

On est maintenant prêts à traiter des transferts d'énergie dans le processus.

Réservoirs A et B:

Les équations reliant les débits d'entrée et de sortie, les températures des liquides d'entrée et de sortie, et les effets de l'énergie fournie par le chauffe-eau de chaque réservoir sont:

Changement d'énergie = Énergie ajoutée - Énergie enlevée

$\Delta É_t = É1_t + C_t - É2_t$

avec

$É1_t$ (énergie ajoutée par le liquide d'entrée au temps t)

$= (D1_t * r * Cp * T1) * I$

C_t (énergie ajoutée par l'élément chauffant au temps t)

$= Watts * I$

$É2_t$ (énergie retirée par le liquide de sortie au temps t)

$= (D2_t * r * Cp * T2) * I$

où: Cp = chaleur massique de l'eau, approx. 4.186 kJ/kg °C, pour une plage de 0-60 °Celsius.

r = densité ou masse spécifique de l'eau = 1000 kg/m^3

Énergie dans le réservoir:

$É_t = É_{t-1} + \Delta É_t$

où: $É_{t-1}$ = énergie dans le réservoir au temps t-1

Réservoir C:

Les équations reliant les débits d'entrée et de sortie, les températures des liquides d'entrée et de sortie, et les effets de l'énergie fournie par le chauffe-eau de chaque réservoir sont:

Changement d'énergie = Énergie ajoutée - Énergie enlevée

$\Delta É_t = É2_t$ (système A) + $É2_t$ (système B) + $C_t - É3_t - É4_t - É5_t$

avec

$É2_t$ = énergie ajoutée par le liquide d'entrée au temps t

C_t = énergie ajoutée par l'élément chauffant au temps t

$É3_t$ = énergie retirée par le liquide de sortie au temps t

$É4_t$ = énergie retirée par le liquide de sortie au temps t

$É5_t$ = énergie retirée par le liquide de sortie au temps t

Énergie dans le réservoir:

$É_t = É_{t-1} + \Delta É_t$

ANNEXE C: ANALYSE MANOVA – SITUATIONS NORMALES

Résultats de Manova sur l'ensemble des données pour les deux sessions d'essais. Les données ont été éditées pour éliminer les informations superflues (en-têtes répétitifs, étapes intermédiaires de calcul, etc.) produites par le progiciel. On a aussi « surligné » en jaune les entêtes principales pour faciliter le repérage des résultats. Les noms de variables suivants sont utilisés: DECLSESX => nombre de déclenchements à la session X, CHSESX => charge mentale à la session X, PRODSESX => production totale à la session X, et COMSESX => nombre de commandes utilisées à la session X. On a utilisé le progiciel SAS pour effectuer cette analyse.

```
                                The SAS System                    434

                        General Linear Models Procedure
                            Class Level Information

                           Class     Levels     Values
                           GROUP          2     1 2

                     Number of observations in data set = 20

 Level of        ----------DECLSES1----------     ----------DECLSES2-----
-----
 GROUP     N       Mean              SD              Mean              SD

 1        10     8.10000000       10.7543273       1.50000000  2.71825107
 2        10     3.20000000        3.3928028       2.10000000  2.60128174

 Level of        -----------CHSES1-----------     -----------CHSES2------
-----
 GROUP     N       Mean              SD              Mean              SD

 1        10    2788.70000       917.871820      1488.40000  940.310965
 2        10    2291.35000       748.957425      1348.99500  885.757636

 Level of        ----------PRODSES1----------     ----------PRODSES2-----
-----
 GROUP     N       Mean              SD              Mean              SD

 1        10    189.783000       100.996280      398.980000  121.564401
 2        10    144.437800        77.480075      327.281000   95.741598


 Level of        -----------COMSES1----------     -----------COMSES2-----
-----
 GROUP     N       Mean              SD              Mean              SD

 1        10    525.900000       95.8997741      435.800000  111.652039
 2        10    399.200000       78.0936759      390.600000   76.114242
```

General Linear Models Procedure
Multivariate Analysis of Variance

Partial Correlation Coefficients from the Error SS&CP Matrix / Prob > |r|

DF = 18	DECLSES1	DECLSES2	CHSES1	CHSES2	PRODSES1	PRODSES2
DECLSES1	1.000000	0.223386	0.465493	0.185144	-0.573697	-0.202113
	0.0001	0.3579	0.0446	0.4480	0.0102	0.4067
DECLSES2	0.223386	1.000000	-0.143349	-0.033657	-0.450064	-0.427802
	0.3579	0.0001	0.5582	0.8912	0.0532	0.0677
CHSES1	0.465493	-0.143349	1.000000	0.673353	-0.360942	-0.113580
	0.0446	0.5582	0.0001	0.0016	0.1290	0.6434
CHSES2	0.185144	-0.033657	0.673353	1.000000	-0.381838	-0.288832
	0.4480	0.8912	0.0016	0.0001	0.1067	0.2304

Partial Correlation Coefficients from the Error SS&CP Matrix / Prob > |r|

DF = 18	DECLSES1	DECLSES2	CHSES1	CHSES2	PRODSES1	PRODSES2
PRODSES1	-0.573697	-0.450064	-0.360942	-0.381838	1.000000	0.713009
	0.0102	0.0532	0.1290	0.1067	0.0001	0.0006
PRODSES2	-0.202113	-0.427802	-0.113580	-0.288832	0.713009	1.000000
	0.4067	0.0677	0.6434	0.2304	0.0006	0.0001
COMSES1	0.490500	0.069320	0.152787	-0.257533	-0.085271	-0.066390
	0.0330	0.7780	0.5323	0.2871	0.7285	0.7871
COMSES2	0.083052	0.349110	0.123503	0.009698	-0.344664	-0.320746
	0.7353	0.1429	0.6145	0.9686	0.1484	0.1806

Partial Correlation Coefficients from the Error SS&CP Matrix / Prob > |r|

DF = 18	COMSES1	COMSES2
DECLSES1	0.490500	0.083052
	0.0330	0.7353
DECLSES2	0.069320	0.349110
	0.7780	0.1429
CHSES1	0.152787	0.123503
	0.5323	0.6145
CHSES2	-0.257533	0.009698
	0.2871	0.9686

Partial Correlation Coefficients from the Error SS&CP Matrix / Prob > |r|

DF = 18	COMSES1	COMSES2
PRODSES1	-0.085271	-0.344664
	0.7285	0.1484
PRODSES2	-0.066390	-0.320746
	0.7871	0.1806
COMSES1	1.000000	0.409387
	0.0001	0.0818
COMSES2	0.409387	1.000000
	0.0818	0.0001

The SAS System 458

General Linear Models Procedure
Multivariate Analysis of Variance

Manova Test Criteria and Exact F Statistics for
the **Hypothesis of no Overall GROUP Effect** for **repeated measures**
on the variables defined by the M Matrix Transformation
H = Type III SS&CP Matrix for GROUP E = Error SS&CP Matrix

S=1 M=1 N=6.5

Statistic	Value	F	Num DF	Den DF	Pr > F
Wilks' Lambda	0.54829664	3.0894	4	15	0.0484
Pillai's Trace	0.45170336	3.0894	4	15	0.0484
Hotelling-Lawley Trace	0.82383026	3.0894	4	15	0.0484
Roy's Greatest Root	0.82383026	3.0894	4	15	0.0484

Multivariate Analysis of Variance

Manova Test Criteria and Exact F Statistics for
the **Hypothesis of no Overall SESSION EFFECT** for **repeated measures**
on the variables defined by the M Matrix Transformation
H = Type III SS&CP Matrix for INTERCEPT E = Error SS&CP Matrix

S=1 M=1 N=6.5

Statistic	Value	F	Num DF	Den DF	Pr > F
Wilks' Lambda	0.09699165	34.9131	4	15	0.0001
Pillai's Trace	0.90300835	34.9131	4	15	0.0001
Hotelling-Lawley Trace	9.31016622	34.9131	4	15	0.0001
Roy's Greatest Root	9.31016622	34.9131	4	15	0.0001

Multivariate Analysis of Variance

Manova Test Criteria and Exact F Statistics for
the **Hypothesis of no Overall GROUP by SESSION EFFECT**
on the variables defined by the M Matrix Transformation
H = Type III SS&CP Matrix for GROUP E = Error SS&CP Matrix

S=1 M=1 N=6.5

Statistic	Value	F	Num DF	Den DF	Pr > F
Wilks' Lambda	0.80887969	0.8860	4	15	0.4958
Pillai's Trace	0.19112031	0.8860	4	15	0.4958
Hotelling-Lawley Trace	0.23627779	0.8860	4	15	0.4958
Roy's Greatest Root	0.23627779	0.8860	4	15	0.4958

Résultats d'analyses supplémentaires pour identifier les variables individuelles pour lesquelles les effets sont manifestés. Ici aussi, les données ont été éditées pour éliminer les informations superflues (en-têtes répétitifs, étapes intermédiaires de calcul, etc.) produites par le progiciel.

```
                          The SAS System                          526

                   General Linear Models Procedure
                       Class Level Information

                        Class     Levels    Values

                        GROUP          2    1 2

                 Number of observations in data set = 20

              Dependent Variable DECLSES1 DECLSES2  (Déclenchements)

                    Level of SESS          1        2

            Manova Test Criteria and Exact F Statistics for
                    the Hypothesis of no SESS Effect
       H = Type III SS&CP Matrix for SESS   E = Error SS&CP Matrix

                          S=1    M=-0.5    N=8

Statistic                 Value          F      Num DF    Den DF  Pr >
F
Wilks' Lambda        0.78790914     4.8453         1        18  0.0410
Pillai's Trace       0.21209086     4.8453         1        18  0.0410
Hotelling-Lawley Trace0.26918188    4.8453         1        18  0.0410
Roy's Greatest Root  0.26918188     4.8453         1        18  0.0410

            Manova Test Criteria and Exact F Statistics for
                    the Hypothesis of no SESS*GROUP Effect
     H = Type III SS&CP Matrix for SESS*GROUP   E = Error SS&CP Matrix

                          S=1    M=-0.5    N=8

Statistic            Value          F      Num DF    Den DF  Pr > F
Wilks' Lambda        0.87924634     2.4721         1        18  0.1333
Pillai's Trace       0.12075366     2.4721         1        18  0.1333
Hotelling-Lawley Trace0.13733769    2.4721         1        18  0.1333
Roy's Greatest Root  0.13733769     2.4721         1        18  0.1333

                   General Linear Models Procedure
                 Repeated Measures Analysis of Variance
            Tests of Hypotheses for Between Subjects Effects

Source            DF    Type III SS   Mean Square   F Value     Pr > F
GROUP              1     46.2250000    46.2250000      1.15     0.2970
Error             18    721.2500000    40.0694444
```

Class Level Information

Class	Levels	Values
GROUP	2	1 2

Number of observations in data set = 20

Dependent Variable CHSES1 CHSES2 (Charge mentale)

Level of SESS 1 2

Manova Test Criteria and Exact F Statistics for
the **Hypothesis of no SESS Effect**
H = Type III SS&CP Matrix for SESS E = Error SS&CP Matrix

S=1 M=-0.5 N=8

Statistic	Value	F	Num DF	Den DF	Pr > F
Wilks' Lambda	0.26573897	49.7356	1	18	0.0001
Pillai's Trace	0.73426103	49.7356	1	18	0.0001
Hotelling-Lawley Trace	2.76309126	49.7356	1	18	0.0001
Roy's Greatest Root	2.76309126	49.7356	1	18	0.0001

General Linear Models Procedure
Repeated Measures Analysis of Variance

Manova Test Criteria and Exact F Statistics for
the **Hypothesis of no SESS*GROUP Effect**
H = Type III SS&CP Matrix for SESS*GROUP E = Error SS&CP Matrix

S=1 M=-0.5 N=8

Statistic	Value	F	Num DF	Den DF	Pr > F
Wilks' Lambda	0.93424006	1.2670	1	18	0.2751
Pillai's Trace	0.06575994	1.2670	1	18	0.2751
Hotelling-Lawley Trace	0.07038869	1.2670	1	18	0.2751
Roy's Greatest Root	0.07038869	1.2670	1	18	0.2751

The SAS System 537

General Linear Models Procedure
Repeated Measures Analysis of Variance
Tests of **Hypotheses for Between Subjects Effects**

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
GROUP	1	1013642.3	1013642.3	0.79	**0.3859**
Error	18	23098983.8	1283276.9		

General Linear Models Procedure
Class Level Information

Class	Levels	Values
GROUP	2	1 2

Number of observations in data set = 20

Repeated Measures Level Information

Dependent Variable PRODSES1 PRODSES2 (Production totale)

Level of SESS 1 2

Manova Test Criteria and Exact F Statistics for
the Hypothesis of no SESS Effect
H = Type III SS&CP Matrix for SESS E = Error SS&CP Matrix

S=1 M=-0.5 N=8

Statistic	Value	F	Num DF	Den DF	Pr > F
Wilks' Lambda	0.12375309	127.4509	1	18	0.0001
Pillai's Trace	0.87624691	127.4509	1	18	0.0001
Hotelling-Lawley Trace	7.08060602	127.4509	1	18	0.0001
Roy's Greatest Root	7.08060602	127.4509	1	18	0.0001

The SAS System 543

General Linear Models Procedure
Repeated Measures Analysis of Variance

Manova Test Criteria and Exact F Statistics for
the **Hypothesis of no SESS*GROUP Effect**
H = Type III SS&CP Matrix for SESS*GROUP E = Error SS&CP Matrix

S=1 M=-0.5 N=8

Statistic	Value	F	Num DF	Den DF	Pr > F
Wilks' Lambda	0.96899600	0.5759	1	18	0.4577
Pillai's Trace	0.03100400	0.5759	1	18	0.4577
Hotelling-Lawley Trace	0.03199600	0.5759	1	18	0.4577
Roy's Greatest Root	0.03199600	0.5759	1	18	0.4577

Tests of **Hypotheses for Between Subjects Effects**

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
GROUP	1	34248.362	34248.362	2.01	0.1736
Error	18	307063.538	17059.085		

General Linear Models Procedure

General Linear Models Procedure
Class Level Information

Class	Levels	Values
GROUP	2	1 2

Number of observations in data set = 20

Repeated Measures Analysis of Variance
Repeated Measures Level Information

Dependent Variable COMSES1 COMSES2 (**Nombre de commandes utilisées**)

Level of SESS 1 2

General Linear Models Procedure
Repeated Measures Analysis of Variance

Manova Test Criteria and Exact F Statistics for
the **Hypothesis of no SESS Effect**
H = Type III SS&CP Matrix for SESS E = Error SS&CP Matrix

S=1 M=-0.5 N=8

Statistic	Value	F	Num DF	Den DF	Pr > F
Wilks' Lambda	0.78594750	4.9023	1	18	0.0400
Pillai's Trace	0.21405250	4.9023	1	18	0.0400
Hotelling-Lawley Trace	0.27234962	4.9023	1	18	0.0400
Roy's Greatest Root	0.27234962	4.9023	1	18	0.0400

Manova Test Criteria and Exact F Statistics for
the **Hypothesis of no SESS*GROUP Effect**
H = Type III SS&CP Matrix for SESS*GROUP E = Error SS&CP Matrix

S=1 M=-0.5 N=8

Statistic	Value	F	Num DF	Den DF	Pr > F
Wilks' Lambda	0.84338494	3.3426	1	18	0.0841
Pillai's Trace	0.15661506	3.3426	1	18	0.0841
Hotelling-Lawley Trace	0.18569820	3.3426	1	18	0.0841
Roy's Greatest Root	0.18569820	3.3426	1	18	0.0841

Repeated Measures Analysis of Variance
Tests of **Hypotheses for Between Subjects Effects**

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
GROUP	1	73874.025	73874.025	6.26	0.0223
Error	18	212571.850	11809.547		

ANNEXE D: ANALYSE DE MANN-WHITNEY U

On a utilisé le progiciel StatView pour Windows pour effectuer les analyses présentées dans cette annexe.

Résultats pour la panne de vanne d'alimentation du réservoir B:

Mann-Whitney U for N. Décl.
Grouping Variable: IHM

U	23,500
U Prime	26,500
Z-Value	-,184
P-Value	,8542
Tied Z-Value	-,207
Tied P-Value	,8356
# Ties	2

Mann-Whitney Rank Info for N. Décl.
Grouping Variable: IHM

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
1	10	81,500	8,150
2	5	38,500	7,700

Mann-Whitney U for Production
Grouping Variable: IHM

U	23,000
U Prime	27,000
Z-Value	-,245
P-Value	,8065
Tied Z-Value	-,245
Tied P-Value	,8063
# Ties	1

Mann-Whitney Rank Info for Production
Grouping Variable: IHM

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
1	10	82,000	8,200
2	5	38,000	7,600

Mann-Whitney U for Charge mentale
Grouping Variable: IHM

U	4,000
U Prime	46,000
Z-Value	-2,572
P-Value	,0101
Tied Z-Value	-2,572
Tied P-Value	,0101
# Ties	0

Mann-Whitney Rank Info for Charge mentale
Grouping Variable: IHM

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
1	10	101,000	10,100
2	5	19,000	3,800

Mann-Whitney U for Rang
Grouping Variable: IHM

U	14,000
U Prime	36,000
Z-Value	-1,347
P-Value	,1779
Tied Z-Value	-1,352
Tied P-Value	,1764
# Ties	1

Mann-Whitney Rank Info for Rang
Grouping Variable: IHM

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
1	10	91,000	9,100
2	5	29,000	5,800

Résultats pour la panne des chauffe-eau des réservoirs A et C:

Mann-Whitney U for N. Décl.
Grouping Variable: IHM

U	21,500
U Prime	28,500
Z-Value	-,429
P-Value	,6682
Tied Z-Value	-,551
Tied P-Value	,5817
# Ties	2

Mann-Whitney Rank Info for N. Décl.
Grouping Variable: IHM

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
1	10	83,500	8,350
2	5	36,500	7,300

Mann-Whitney U for Production
Grouping Variable: IHM

U	20,000
U Prime	30,000
Z-Value	-,612
P-Value	,5403
Tied Z-Value	-,612
Tied P-Value	,5403
# Ties	0

Mann-Whitney Rank Info for Production
Grouping Variable: IHM

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
1	10	85,000	8,500
2	5	35,000	7,000

Mann-Whitney U for Charge mentale
Grouping Variable: IHM

U	16,000
U Prime	34,000
Z-Value	-1,102
P-Value	,2703
Tied Z-Value	-1,102
Tied P-Value	,2703
# Ties	0

Mann-Whitney Rank Info for Charge mentale
Grouping Variable: IHM

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
1	10	89,000	8,900
2	5	31,000	6,200

Mann-Whitney U for Rang
Grouping Variable: IHM

U	14,000
U Prime	36,000
Z-Value	-1,347
P-Value	,1779
Tied Z-Value	-1,347
Tied P-Value	,1779
# Ties	0

Mann-Whitney Rank Info for Rang
Grouping Variable: IHM

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
1	10	91,000	9,100
2	5	29,000	5,800

Résultats pour la panne de vanne d'évacuation du réservoir B:

Mann-Whitney U for N. Décl.
Grouping Variable: IHM

U	20,000
U Prime	30,000
Z-Value	-,612
P-Value	,5403
Tied Z-Value	-1,038
Tied P-Value	,2994
# Ties	2

Mann-Whitney Rank Info for N. Décl.
Grouping Variable: IHM

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
1	10	85,000	8,500
2	5	35,000	7,000

Mann-Whitney U for Production
Grouping Variable: IHM

U	14,000
U Prime	36,000
Z-Value	-1,347
P-Value	,1779
Tied Z-Value	-1,347
Tied P-Value	,1779
# Ties	0

Mann-Whitney Rank Info for Production
Grouping Variable: IHM

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
1	10	91,000	9,100
2	5	29,000	5,800

Mann-Whitney U for Charge mentale
Grouping Variable: IHM

U	19,000
U Prime	31,000
Z-Value	-,735
P-Value	,4624
Tied Z-Value	-,735
Tied P-Value	,4624
# Ties	0

Mann-Whitney Rank Info for Charge mentale
Grouping Variable: IHM

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
1	10	86,000	8,600
2	5	34,000	6,800

Mann-Whitney U for Rang
Grouping Variable: IHM

U	18,000
U Prime	32,000
Z-Value	-,857
P-Value	,3913
Tied Z-Value	-,857
Tied P-Value	,3913
# Ties	0

Mann-Whitney Rank Info for Rang
Grouping Variable: IHM

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
1	10	73,000	7,300
2	5	47,000	9,400

Résultats pour la panne de fuite dans le réservoir C:

Mann-Whitney U for Charge m.
Grouping Variable: IHM

U	23,000
U Prime	47,000
Z-Value	-1,171
P-Value	,2416
Tied Z-Value	-1,171
Tied P-Value	,2416
# Ties	0

Mann-Whitney Rank Info for Charge m.
Grouping Variable: IHM

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
1	10	102,000	10,200
2	7	51,000	7,286

Mann-Whitney U for Rang
Grouping Variable: IHM

U	0,000
U Prime	70,000
Z-Value	-3,416
P-Value	,0006
Tied Z-Value	-3,824
Tied P-Value	,0001
# Ties	1

Mann-Whitney Rank Info for Rang
Grouping Variable: IHM

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
1	10	125,000	12,500
2	7	28,000	4,000